

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинство

Ниво студија: Основне студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Електрохидрауличне компоненте система АУ

Број индекса: 45/2004

Невена Ј. Ђорђевић

**Електро-машинска опрема малих
хидроелектрана
дипломски рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Професор Др Душан Гордић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да

Препоручена литература:

- [1] Мирослав Михајловић, *Мале хидроелектране – пројектовање и изградња*, Хидропројект, Београд, 1985.
- [2] Миленко Б. Ђурић, Жељко Р. Ђуришић, Александар Р. Чукарић, Веселин Илић, *Електране*, Беопрес, Београд, 2010.
- [3] Adam Harvey, *Micro-hydro design manual- A guade to small-scale water power schemes*, Intermediate Technology Publications, London, 1993.

Крагујевац, 2013

ментор:

Душан, Гордић редовни професор

Резиме

У овом раду се дефинишу и проучавају главне компоненте електро-машинске опреме МХЕ (због обима и њиховог значаја, турбине неће бити проучаване). Електро-машинска опрема треба да конвертује енергију струјања воде у електричну енергију, да је контролише и да је пренесе на електроенергетске мреже. Турбине и генератори су најбитније компоненте јер оне доминантно одређују трошкове изградње МХЕ.

У овом раду дефинисана је хидроенергија, појам малих хидроелектрана, њихови облици, предности и мане. Од начина функционисања малих хидроелектрана представљени су различити начини регулације као и основни елементи управљачког система. Преносни систем малих хидроелектрана има улогу да пренесе снагу од турбине до генератора па су дефинисани различити типови преносника, начин повезивања турбине и генератора, уз прорачун плоснатог каишног преносника, избор лежаја и димензионисање вратила. Генератори наизменичне струје су најпогоднији избор за мале хидроелектране па је ова електро опрема детаљније описана уз начин повезивања на мрежу електроенергетског система.

Кључне речи: Мале хидроелектране, електро-машинска опрема, генератори, преносници

Abstract

Main components of electromechanical equipment of small hydro power plants are defined and studied in the diploma thesis (because of their importance and scope of the presented work, turbines are not studied). Electromechanical equipment should convert the energy of the water flow into electricity, to control it and to transmit it to the power grid. Turbines and generators are the most important components because they predominantly determine the costs to build small hydro power plants.

Hydro power, concept of small hydro power plants, their forms, advantages and disadvantages of their use are defined in this thesis. Considering the way of functioning of small hydro power plants, different modes of regulation are described, as well as the basic elements of control system. Drive system for small hydro power plants has a role to transfer power from the turbine to the generator. Therefore, different types of drive systems, different way of connecting turbines and generators, with a calculation of belts, bearings and shaft sizing are defined in the thesis. AC Generators are the most suitable choice for small hydro power plants and the electrical equipment is described. Also the way of connecting a small hydro power plant to the grid power system is shown.

Keywords: Small hydro power plants, electromechanical equipment, generators, drive system

Садржај

Резиме.....	2
Abstract.....	2
1.0 Увод.....	4
2.0 Хидроелектране	6
2.1 Мале хидроелектране	7
2.1.2 Подела и делови малих хидроелектрана	7
2.1.3 Предности и мане МХЕ	12
3.0 Управљачки системи МХЕ	13
4.0 Преносни систем	22
4.1 Директно спојени преносник	24
4.2 Каишни и ремени преносник	28
4.2.1 Пљоснати каишеви	31
4.2.2 Трапезни каишеви	31
4.2.3 Позиција ременице на вратилу	32
4.2.4 Методе затезања каиша	33
4.3 Прорачун каишних преносника	35
4.4 Лежаји	40
4.4.1 Клизни лежаји	41
4.4.2 Котрљајни лежаји	41
4.4.3 Избор лежаја	42
4.5 Димензионисање вратила.....	44
5.0 Генератори у МХЕ.....	49
5.1 Синхрони генератори	52
5.2 Асинхрони генератори	55
5.2.1 Асинхрони генератор за паралелни рад	55
5.2.2 Асинхрони генератори за самостални рад	56
6.0 Везивање малих хидроелектрана на мрежу ЕЕС.....	59
Закључак	64
Литература	65

1.0 Увод

Хидроенергија представља обновљиви извор енергије, који се вековима користи за добијање механичке, а већ дуже од сто година и електричне енергије помоћу механичке енергије воденог тока. [1]

Хидроенергија или енергија воде представља један од најзначајнијих обновљивих извора енергије, а истовремено је економски најконкурентнији фосилним горивима и нуклеарној енергији. Циклус кружног испарења воде из океана, мора, језера, река, са површине тла, која се кондезује и враћа у облику падавина, представља обновљиви извор енергије. Када се говори о енергији воде мисли се на енергију речних токова, тако да постоје велике хидроелектране изграђене на великим речним токовима и мале хидроелектране које се граде на малим најчешће планинским брзим рекама. Такође у хидроенергију спада и енергија таласа и енергија плиме и осеке. [2]

Енергију речних токова, запазили су људи још у најстарија времена. Већ у Старом веку су почели да размишљају како би могла да се искористи снага воде, како спречити пустошења, како натерати реке да напајају поља и замењују људски рад. Прво су у земљама Мале Азије почела да се граде примитивна водна кола. Дрвени точкови пречника од неколико метара и једним крајем потопљени у воду, ослањали су се својим вратилом на дрвену конструкцију. Речна струја је захватала даске, које су биле причвршћене за обод точка, повлачила их је за собом и на тај начин окретала точак. Ведрице заковане за точак пуниле су се водом приликом обртања точка, издизале су се и у олук изливале воду која је затим отицала у поља. Неколико векова пре наше ере, почеле су да се граде воденице, које су на сличан начин користиле енергију воде. [3]

У Средњем веку градила су се водна кола која су за обртање користила тежину воде при њеном падању на малим водопадима. Тек средином 19. века дошло се на идеју да се положајна енергија воде прво претвори у кинетичку енергију и делимично у енергију притиска, а тек у механички рад уз помоћ водног мотора.



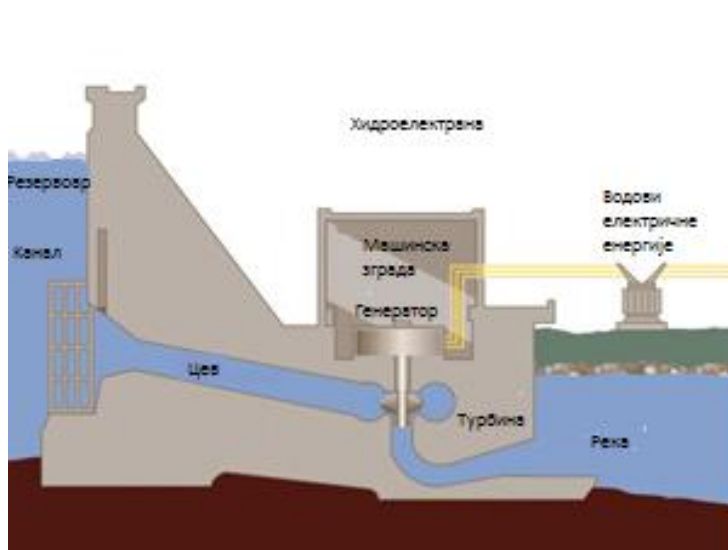
Слика 1.0 - Воденица ¹

¹ Преузето са <http://veraphotography.blog.rs/>

2.0 Хидроелектране

Хидроелектране су постројења у којима се потенцијална енергија воде (трансформисана енергија сунчевог зрачења) прво претвара у кинетичку енергију њеног струјања (у статору турбине), а затим у механичку енергију (у ротору турбине) обртања вратила турбине, па коначно, у електричну енергију у генератору. [4]

Енергетске карактеристике сваке хидроелектране зависе од водотока на коме се она гради, односно од протока (од укупне расположиве воде и њене расподеле током године) и пада. Проток, пад и количина воде се не могу бирати али се конструкционим мерама могу побољшати услови за коришћење природног водног потенцијала, као што је преграђивање водног тока браном и формирањем акумулационих језера. На тај начин се подиже ниво воде и искористиви пад се концентрише на знатно краћу деоницу речног тока, уз истовремено смањење губитка пада.[2]



Слика 2.0 - Шема хидроелектране²

Хидроелектране могу бити подељене на основу различитих критеријума. Хидроелектране се могу поделити према њиховом смештају, паду водотока, начину коришћења воде, запремини акумулационог базена, смештају машине, улози у електроенергетском саставу, снази итд.

Према инсталираној снази хидроелектране могу бити:

- велике,
- мале.

² Преузето са http://sh.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Hydroelectric_dam.png

2.1 Мале хидроелектране

Под појмом мале хидроелектране (МХЕ) подразумевају се хидроелектране које су инсталиране на малим водотоцима. Главни критеријум на основу кога је дефинисана МХЕ је инсталирана снага. Најраспрострањеније је становиште да се под МХЕ подразумевају хидроелектране инсталиране снаге до 10 MW, што је став Европске комисије, Међународне уније произвођача и дистрибутера електричне енергије (UNIPED) и Европске асоцијације за мале хидроелектране (ESHA). У Србији је такође прихваћена граница до 10 MW као горња граница за МХЕ. [5]

Мале хидроелектране се могу дефинисати и према критеријуму пречника обртног кола. У категорију МХЕ се могу сврстати све оне хидроелектране које имају пречник радног кола $D < 3 \text{ m}$.

За мале хидроелектране се сматра да немају никакав штетан утицај на околину, за разлику од великих, чија се штетност описује кроз велике промене екосистема (градња великих брана), утицаја на земљиште, плавлeње, утицај на свакодневни живи свет, повећана емисија метана и постојање штетних емисија у читавом животном циклусу хидроелектране, које су углавном везане за период изградње електране, производње материјала и транспорт. [4]

2.1.2 Подела и делови малих хидроелектрана

Систем мале хидроелектране се састоји од свих објеката и делова који служе за скупљање, довођење и одвођење воде, за претварање механичке у електричну енергију, за трансформацију и развод електричне енергије. Карактеристични делови хидроелектране су: брана или преграда, захват, довод, водна комора, притисни цевовод, машинска зграда (турбина, генератор) и одвод воде. [4]

Према инсталираној снази мале хидроелектране се деле:

- цепне хидроелектране до 20 kW,
- мини хидроелектране од 20 до 500 kW,
- мале хидроелектране од 0,5 до 10 MW.

Према начину коришћења воде, односно регулације протока, деле се на:

- проточне мале хидроелектране,
- акумулационе. [5]

Проточне МХЕ практично раде на тренутни доток воде. Промена дотока воде у току године може бити веома велика, тако да се МХЕ мора прилагођавати у погледу протока. За правилан избор инсталираног протока код проточних МХЕ врло је важно познавати годишњи профил протока речног тока. Код водотокова са великим варијацијама протока обично се постављају по два (или више) агрегата од којих један ради стално, а други само у кишном преиоду године, када се имају највећи дотоци воде. Избор оптималног инсталираног протока МХЕ представља један од најважнијих пројектантских задатака и мора се сагледати кроз комплексну техно-економску анализу.

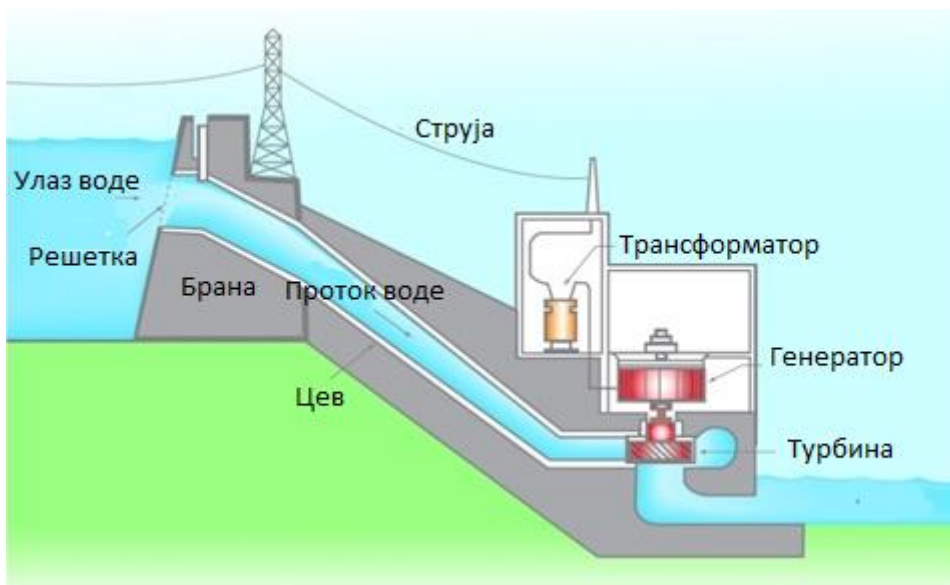
Проточне хидроелектране су електране које немају своју акумулацију или имају акумулацију која се, за време рада хидроелектране при номиналној снази, може испразнити за мање од два сата. Оваква хидроелектрана има малу висинску разлику испред и иза места захватања воде тако да практично не користи потенцијалну енергију већ само кинетичку енергију воденог тока.

Акумулациона хидроелектрана се прави преграђивањем реке или заустављањем тока (брана). То доводи до стварања акумулационог језера узводно од бране која саджи велике количине воде што представља резервоар енергије или се може користити у друге сврхе (наводњавање, риболов итд.). Код овакве врсте електране постоје велике годишње варијације у количини дотока воде. Акумулационо језеро поседује потенцијалну енергију која је резултат високе разлике горње коте језера и тачке монтаже генератора, а која се претвара у кинетичку енергију воде што покреће лопатице турбине. Вода се од бране води тунелима који могу бити километрима дуги до места где је саграђено постројење електране са турбинама и генераторима.

Акумулација омогућава оптимизацију рада МХЕ, како са техничког, тако и са економског становишта. Проблематика оптимизације се може посматрати кроз проблематику хидро-термо координације на нивоу МХЕ.

Хидро-термо координација је карактеристична оперативна функција за системе који имају знатне инсталиране и хидро и термо капацитете великих снага. Међутим, у условима постојања значајних хидро капацитета у виду акумулационих МХЕ у једном ЕЕС-у, проблем хидро-термо координације добија на значају и на овом нивоу. Ова комплексна проблематика се практично своди на оптимално управљање акумулацијама МХЕ, односно на регулацију протока уз уважавање ограничења, као што је биолошки минимум или других ограничења која могу да захтевају водопривредна предузећа (снабдевање локалног водовода, система за наводњавање и сл.).

Према начину експлоатације, односно учешћу у покривању дијаграма оптерећења у ЕЕС-у, МХЕ које раде паралелно са мрежом могу бити базне и вршне. *Базне* МХЕ раде у непрекидном режиму и покривају основне потребе потрошача за снагом (енергијом). *Вршне* МХЕ раде по потреби и покривају вршна оптерећења и то су по правилу акумулационе МХЕ.



Слика 2.1.2.1 - Акумулациона мала хидроелектрана ³

Према нето паду:

- са ниским падом ($H < 30 \text{ m}$)
- са средњим падом ($30 \text{ m} > H < 100 \text{ m}$)
- са високим падом ($H > 100 \text{ m}$).

Од величине нето пада зависи избор турбине и положај машинске зграде у којој је смештен агрегат.

Према повезаности са мрежом и начином рада:

- изоловане електране – самостални рад,
- електране везане на мрежу – паралелни рад,
- електране које раде под режимом: on – off,
- електране у којима ради једна, две или више јединица,
- електране које раде по потреби, у зависности од потрошње. [4]

Изоловане МХЕ се користе за спајање малих сеоских подручја, фарми, мањих туристичких насеља и сличних објеката који су удаљени од електричне мреже, а лоцирани су у близини речног тока. У оваквим изолованим постројењима одржавање квалитета електричне енергије у погледу напона и фреквенције је посебан инжењерски проблем, па се користе комплексни системи регулације. МХЕ које раде паралелно са

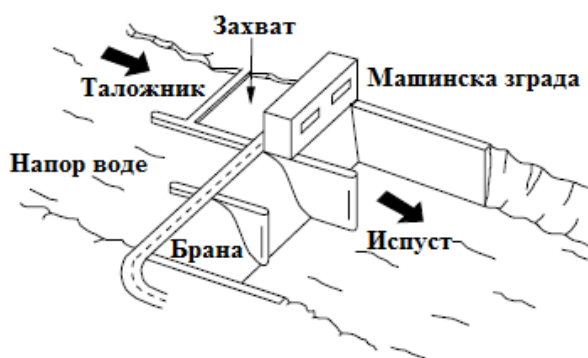
³ Преузето са <http://www.opg.com/power/images/hydrohow.jpg>

мрежом су једноставније од аутономних постројења, па самим тим захтевају и мања улагања. [5]

Према начину коришћења параметара хидрауличне снаге (притиска и напора) и локацији машинске зграде:

- бранске,
- деривационе,
- комбиноване,
- проточне.

Бранске хидроелектране имају примену код малих акумулација које се пројектују за потребе наводњавања, водоснабдевања, туризма, заштите од поплава и слично. [6] Тада је могуће произвести електричну енергију на рачун количине воде која иначе отиче из акумулације.



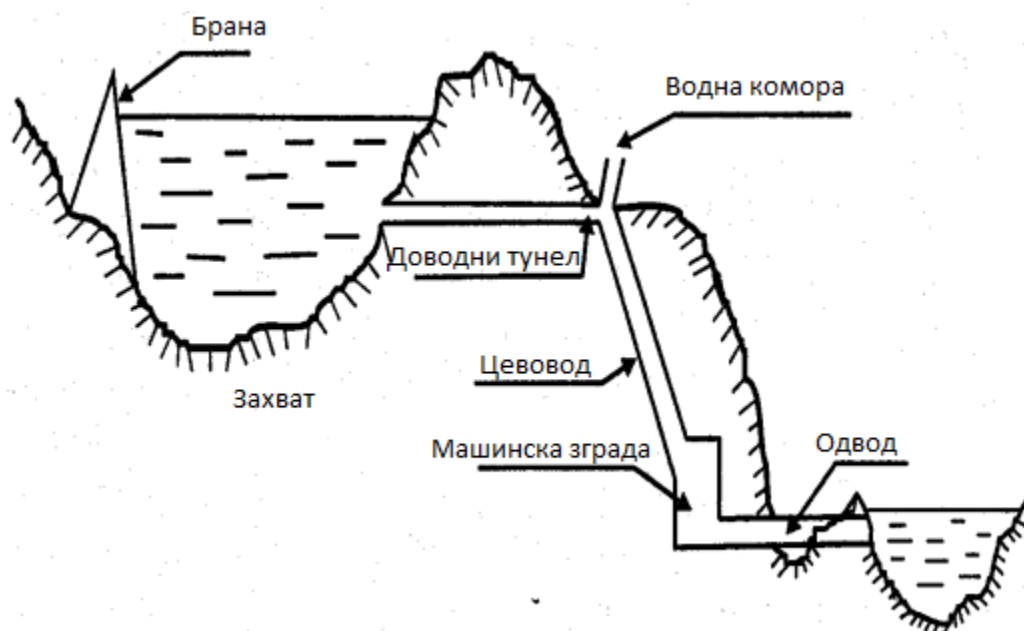
Слика 2.1.2.2 - Шема хидроелектране са машинском зградом на самој брани [6]

Деривацијска хидроелектрана је врста акумулационе хидроелектране код које се машинска зграда за производњу енергије налази измештена на некој удаљености (низводно од бране), а вода се из акумулационог језера доводи посебним цевима са захвата до машинске зграде. [7]

Деривацијске хидроелектране се граде, осим у брдовитим пределима, и у равници када се градњом бране, а због неповољних топографских услова, не остварује економична концентрација пада. У таквим се случајевима вода доводи хидроелектрани тунелом или додатним коритом.

Деривацијске хидроелектране могу бити гравитацијске или притисне. У њима се највећи део концентрације пада постиже тунелима или каналима, а само мањи бранама. Када се знатан део пада остварује браном, говори се о комбинованој хидроелектрани (комбинација прибранске и деривацијске). У гравитацијској хидроелектрани вода се доводи турбинама каналом или гравитацијским тунелом. Из машинске зграде вода се враћа у корито реке одводним каналом.

На слици 2.1.2.3 приказана је једна деривациона хидроелектрана, а на слици 2.1.2.2 приказана је шема хидроелектране са машинском зградом у самој брани. [6]



Слика 2.1.2.3 - Деривацијска мала хидроелектрана⁴

Према регулисаности протока:

- са протоком који се може регулисати, регулација на уласку у турбину (ручна или аутоматска),
- са сталним протоком. [4]

Из наведених примера може се закључити да највеће разлике при грађењу малих хидроелектрана проистичу из различитих терена. Терен утиче у толикој мери да не постоје два иста постројења. Идеално решење представља да се машинска зграда налази непосредно поред бране – када се пад користи на оном месту на коме је настао. Овакво решење је јефтиније и боље искоришћава расположиву енергију, јер не постоје губици услед отпора у доводним органима. Међутим, подизање високих брана није увек могуће, јер околни терен то не допушта. Да би подизање скупог постројења било економски прихватљиво, добијена снага треба да одговара инвестиционим трошковима, што значи да при малим падовима, које оваква постројења користе, проток мора бити прилично велики. [6]

⁴ Преузето са <http://www.ekologija.ba/userfiles/file/Obnovljivi%20izvori%20energije%20-%20Studija.pdf>

2.1.3 Предности и мане МХЕ

Предности коришћења малих хидроелектрана су:

- ради се о чистом и обновљивом извору енергије, јер за погон користе воду, која се у процесу производње електричне енергије не троши,
- у поређењу са великим хидроелектранама нема плављења широких подручја (како би се обезбедио простор за акумулацију воде) и нарушавања локалног еколошког система,
- могу обезбедити наводњавање земљишта, као и снабдевање водом околних насеља, изградњу рибњака и заштиту од поплава,
- смањују се инвестициона улагања за електрификацију удаљених насеља од опште електричне мреже, а електрификацијом таквих руралних насеља доприноси се унапређењу њиховог развоја,
- пошто су најчешће лоциране близу корисника, губици електричне енергије у преносу се смањују и растерећује се електро мрежа,
- доприносе отварању нових радних места за надгледање функционисања електране, експлоатишу се уз релативно ниске трошкове,
- радни век је врло дуг, у просеку 30 година, мада има МХЕ које раде и 80 и више година.

Што се тиче мана које се односе на коришћење малих хидроелектрана, неке од њих су наведене у наредном делу текста:

- потреба обезбеђења биолошког минимума (резервног тока),
- потреба уградње пролаза за рибе (повреде и миграција риба, утицај на непосредни еко-систем),
- бука, вибрације, визуелно нарушавање околине,
- основни проблем при раду у електроенергетском систему представља несталан проток, који се огледа у варијацији тока као и мала акумулација,
- компликована изградња и релативно високи инвестициони трошкови. [6]

3.0 Управљачки системи МХЕ

У зависности од начина функционисања малих хидроелектрана постоје различити начини регулације.

Један од предуслова за економичну израду малих хидроелектрана јесте остварење аутоматских погона са могућношћу даљинског управљања контролом рада. Наравно да се подразумева повремени обилазак објеката од стране екипа за одржавање и благовремену контролу појединих виталних делова агрегата од којих зависи квалитет производње и сигурност рада. [5]

Управљачки систем МХЕ чине:

- турбински регулатор,
- аутоматика генератора,
- старт/стоп аутоматика,
- регулатор нивоа воде,
- групни регулатор са преклопном аутоматиком,
- уређаји за мерење, заштиту и сигнализацију.

Нарочиту пажњу заслужује турбински регулатор, јер од њега зависи квалитет енергије у самосталној мрежи и сигурност рада. Турбински регулатор је најскупљи део управљачког система и релативно велики потрошач енергије агрегата, па његова исправност, пре свега, утиче на цену произведене енергије, а затим и на век трајања целог агрегата.

Турбине у МХЕ се пројектују и израђују тако да за изабрани проток и нето пад раде са максималним степеном корисности. Свака промена ових параметара мора се компензовати отварањем или затварањем управљачког уређаја да би се одржала или константна снага на излазу, ниво горње воде или проток воде кроз турбину. [8]

Радне карактеристике водне турбине првенствено су одређене њеном геометријом и кинематиком (зависе од величине и облика турбине и од брзине обртања радног кола). Ако је геометрија константна, односно ни један од елемената турбине не мења свој облик или положај, турбина је нерегулисана. У супротном турбине су регулисане и имају своје хидрауличке и енергетске карактеристике прилагодљиве широком дијапазону услова рада. [9]

Под системом турбинске регулације подразумева се скуп елемената, уређаја и машина који обезбеђују регулацију броја обртаја и снаге агрегата. Овај систем чине: турбина, турбински регулатор и извршни регулациони орган. Систем за контролу

брзине заснован је на механичким регулаторима осетљивим на промену брзине и хидрауличким затварачима за управљање дотоком воде у турбину. Турбински регулатор обезбеђује следеће функције: аутоматско покретање турбине из стања мировања и регулацију броја обртаја у празном ходу, регулација броја обртаја (фреквенције) у самосталном раду агрегата, аутоматско одржавање жељеног нивоа воде или снаге при паралелном раду агрегата са мрежом, и аутоматско заустављање агрегата.

Функционисање у самосталном режиму рада обавезно захтева регулацију фреквенције.

У самосталном режиму, када се генерише струја од стране синхроних генератора, фреквенција је одређена брзином генератора и бројем полова. Ако се ова брзина повећава или смањује, фреквенција се такође повећава или смањује. Иако већина генератора има неки облик регулације напона, промена брзине донекле утиче на излазни напон. [10]

Електрична опрема је пројектована да ради на специфичном напону и фреквенцији. Рад при напону и фреквенцији који нису прописани може изазвати озбиљна оштећења. На пример, електрични мотор ће се загревати ако је фреквенција сувише ниска или може да изгори пре него што се укључи ако је напон сувише низак, тако да је потребна нека врста контроле брзине генератора. Како је брзина генератора одређена брзином турбине, брзина турбине мора бити регулисана. Управљачки уређај контролише брзину опреме турбине/генератора мењајући спољашња електрична оптерећења на генератору.

Код синхроних генератора фреквенција (f) наизменичне струје коју производи генератор и број обртаја (n) његовог ротора спрегнути су једначином:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (3.0.1)$$

где је p број пари полова генератора.

Према томе, код свих турбина основни задатак је регулисање броја обртаја њиховог радног кола са тачно утврђеним толеранцијама, које допушта електроенергетска мрежа. [11]

Диференцијална једначина која описује ротационо кретање турбинског радног кола и свих елемената који су спојени са њим гласи:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_G \quad (3.0.2)$$

где је:

$J [kgm^2]$ - момент инерције свих обртних делова турбине, генератора и спољних конструкција елемената,

$\frac{d\omega}{dt} [s^{-2}]$ - угаоно убрзање свих ротирајућих делова,

$M_T [Nm]$ – активни погонски момент турбине,

$M_G [Nm]$ – контрамомент електричног генератора, увећан за све отпорне моменте.

Пошто је M_G функција оптерећења електричне мреже, које је стохастичко, мора се, у циљу одржавања $\omega = const$, односно $\frac{d\omega}{dt} = 0$, непрестано регулисати активни погонски момент турбине M_T .

Имајући у виду да је M_T функција напора и протока кроз турбину, јасно је да ће регулисањем протока, односно напора, моћи, у дозвољеним толеранцијама, бити задовољен услов:

$$M_T \approx M_G \quad (3.0.3)$$

У самосталном режиму рада преоптерећење генератора успорава турбину па је стога потребно повећати проток воде кроз турбину да би се обезбедило да турбина не губи на брзини. Ако не постоји довољно воде да би се повећао проток, део оптерећења генератора мора да буде уклоњен (генератор мора делимично да се растерети). У супротном турбина мора да се искључи из погона. Насупрот томе ако оптерећење генератора опада, онда се проток кроз турбину смањује или може да се одржава константним, а вишак произведене електричне енергије може да се одбаци у електричном балансном оптерећењу које је повезано на прикључке генератора.

У циљу да се одреди регулатор, неопходно је да се пронађе толеранција фреквенције и напона електричне опреме, коју покреће струја из турбине. [10]

Препорука је да толеранције напона и фреквенције електричног система буду:

- Напон: $\pm 7\%$ од одређене вредности;
- Фреквенција: до 5% изнад, али не и испод одређене вредности.

Када електрични систем снабдева само одређене типове оптерећења, као што је осветљење, одступање од ограничења напона и фреквенције могу да буду већа.

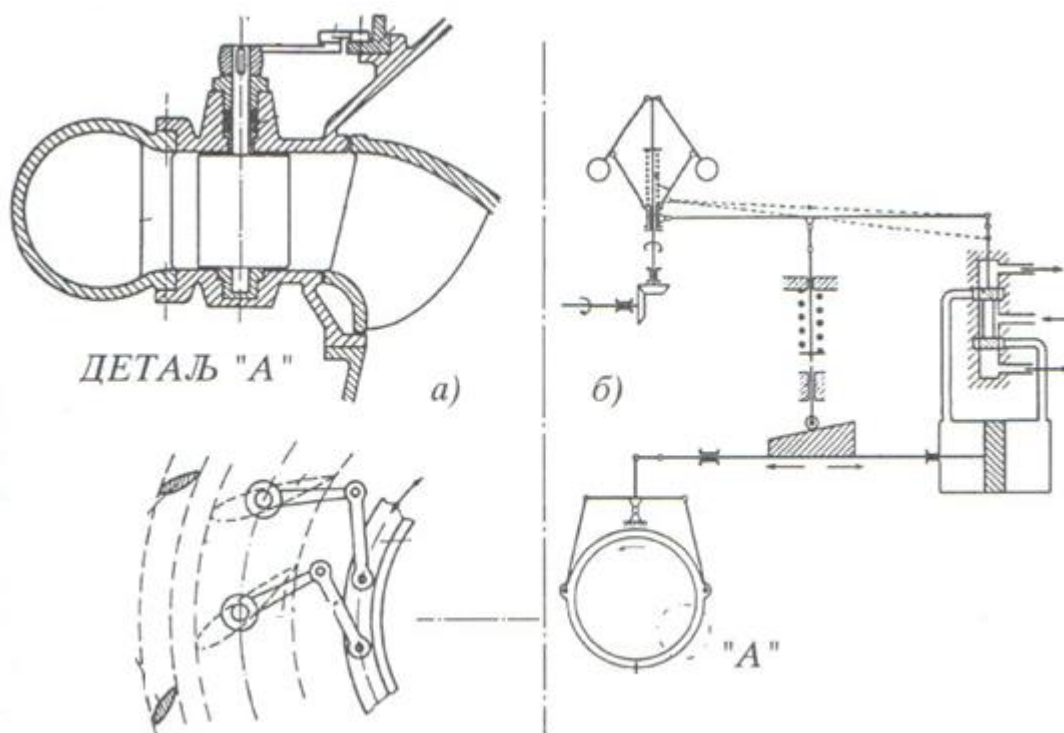
За регулисање брзине обртања ротора генератора користе се два различита система:

- турбински регулатори (за регулацију брзине/броја обртаја турбине приликом протока кроз турбину)

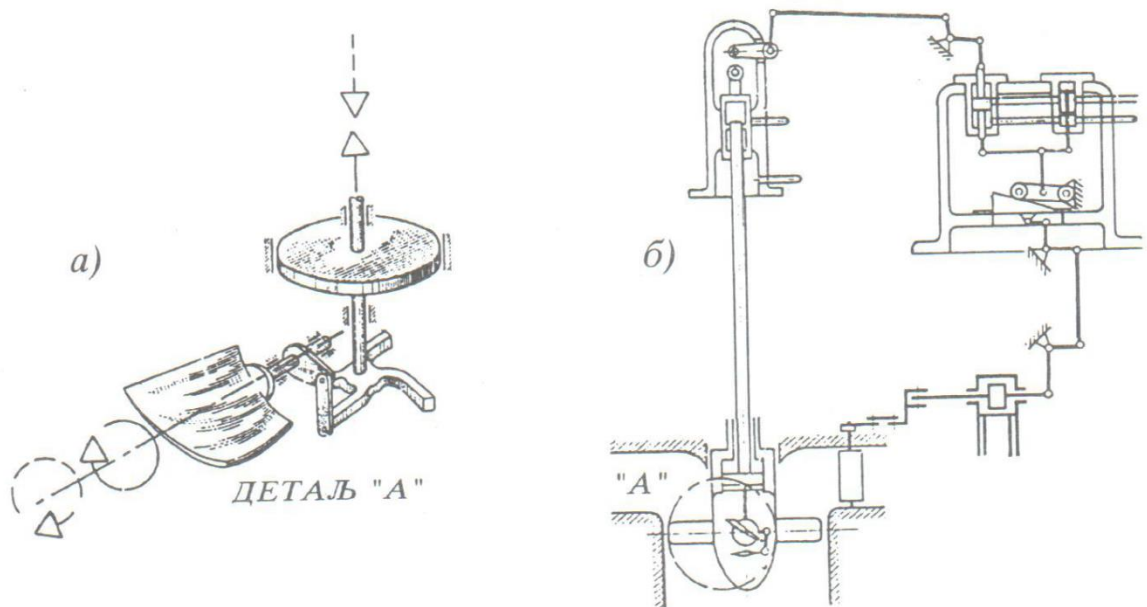
- електронски контролори оптерећења генератора.

Турбински регулатори се користе да контролишу брзину турбине. Начин регулисања брзине турбине је различит за поједине типове турбина. Пелтонова турбина се регулише посебним регулационим копљем, Франсисова спроводним агрегатом, а пропелерна турбина има више могућности регулисања: помоћу лопатица спроводног апарата, помоћу лопатица ротора или комбиновано. [5]

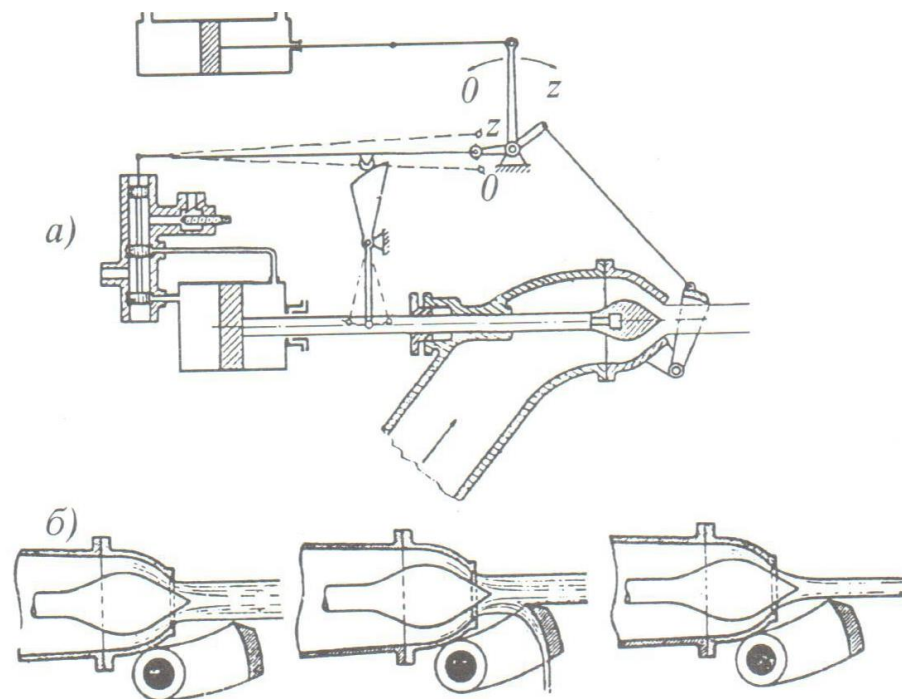
Регулисање фреквенције електричне струје коју производи генератор спрегнут са турбином обично се врши аутоматски. Под аутоматским регулатором фреквенције, односно броја обртаја радног кола турбине, подразумева се мерно регулациона опрема којом се мери предметни број обртаја радног кола, упоређује се са задатом вредношћу и формира управљајуће дејство на регулационе органе (усмерене лопатице). [11]



Слика 3.1 - Шематски приказ начина регулације код Франсисове турбине уз помоћ усмерних лопатица а) детаљ регулационог преткола, б) шема регулације [11]



Слика 3.2 - Шематски приказ начина регулације код Капланове турбине уз помоћ синхроног заокретања усмерених лопатица и лопатица радног кола а) детаљ регулационих лопатица радног кола, б) шема регулације [11]



Слика 3.3 - Шематски приказ начина регулације код Пелтонове турбине уз помоћ копља а) шема регулације, б) методологија скретања малза [11]

Сваки агрегат је пројектован и израђен тако да даје оптималне ефекте при оптималном оптерећењу.

Према деловању турбински регулатори могу да се поделе на линеарне и импулсне.

Линеарни регулатори могу бити:

- Механички,
- Механичко-хидраулички,
- Електро-хидраулички,
- Електро-електрични. [5]

Механички регулатори захтевају релативно велику силу за покретање регулационог механизма, па се за микро, мини и мале турбине не користе, сем за покретање механизма за скретање малаза код турго и Пелтонове турбине.

Механичко-хидраулички регулатори се врло често употребљавају, јер за покретање регулационог механизма користе уље под притиском а и вишеструко могу повећати силу за покретање регулационог механизма. Али пошто ови регулатори захтевају велике димензије, због количине утрошеног материјала не користе се за мале хидроелектране.

Електро-хидраулички регулатори се често користе јер испуњавају скоро све захтеве високог квалитета и стабилности регулације. Али код ових регулатора је сложен процес претварања електричних излазних сигнала у хидрауличке ефекте регулатора.

Електро-електрични регулатор је веома погодан на малим турбинама, јер специјалним погонским електромотором преноси излазне сигнале. Недостатак овог регулатора је што при пуштању у рад захтева велику количину енергије.

Код регулације агрегата значано је обезбедити заштиту од неконтролисане брзине обртања турбине, односно побега турбине. Услед испада из синхронизма или квара у прикључној мрежи (кратак спој или прекид прикључног вода), као и наглог растерећења агрегата у изолаваном раду, агрегат не може пласирати енергију ЕЕС (потрошачу). У таквим условима развијена механичка снага турбине троши на убрзање замајних маса турбина - ротор генератора. Турбина повећава брзину сразмерно снази турбине и обрнуто сразмерно инерцији замајних маса система турбина – генератор. Због чега регулациони елементи морају брзо реаговати и затворити доток воде у турбину. Типична вредност побега турбине је 80% изнад синхроне брзине. [9]

Регулација фреквенције је могућа и када турбина нема регулациони механизам (нерегулациона турбина). Турбина тада ради са константном, унапред одређеном снагом. Свака промена снаге потрошача мења и фреквенцију. Регулатор фреквенције управља електричним системом, који дели произведену електричну енергију на два дела, од којих се један користи у електричној мрежи, а други се уништава или

акумулира. Овакви системи се ретко користе у постројењима снаге преко 100 kW, док за коришћење система са турбинским регулаторима нема ограничења снаге. [5]

У случају када је МХЕ повезана са електро енергетском мрежом уобичајена је регулација нивоа или протока. Код регулационих турбина њихове проточне површине се отварају/затварају да би се одржао жељени ниво горње воде или проток кроз турбину. Оба параметра није могуће истовремено регулисати. Тако да један од ова два параметара мора бити константан а други променљив. Код деривационих хидроелектрана увек је променљив проток, а константан пад, док код акумулационих може бити променљив или проток или пад. Регулација је неопходна за веће водне турбине, због сигурности у погону а и због оптималног искоришћења хидрауличке енергије воде.

У случају да агрегат ради паралелно са електроенергетским системом лако га је аутоматизовати. Агрегат ради без посаде и оптимално користи воду која дотиче. *Регулатор нивоа* тада регулише ниво горње воде, при чему се регулационим механизмом турбина прилагођава расположивој води. Мерење нивоа може се извршити на више начина: на самом горњем нивоу уз помоћ пловка са различитим сондама или са положајним прекидачима. У неким случајевима мерење горњег нивоа могуће је преместити у саму машинску зграду. Тада је погодан електронски тип регулатора, мада се могу користити и други типови. Потпуно задовољавајући, за ту врсту регулације, је тачкасти регулатор. Он не захтева тачно мерење нивоа воде, већ се уграђује положајни прекидач за горњи, доњи и најнижи ниво. За регулацију хидроагрегата за ниво горње воде потребан је и синхронизатор који синхронизује генератор на напон мреже. Притиском на погонски тастер ређају се секвенце за покретање регулатора до оптерећења агрегата које одговара расположивој води.

Као и код регулације нивоа, *регулација протока* могућа је ако агрегат ради паралелно са електричном мрежом. Најчешће се појављује када агрегат ради у склопу индустријских процеса и искоришћава расположиву водну енергију. Такође и системи за наводњавање из акумулација најчешће захтевају унапред предвиђене величине протока без обзира на расположиви пад. Тада је хидроагрегат добродошао као регулациони орган.

Мерење протока се изводи помоћу разлике притисака између два карактеристична места у проточном систему, али је могуће мерење и другим методама: мерењем помоћу крилаца у проточној цеви, индуктивним мерачем или помоћу различитих мерних сонди. За регулацију протока најбољи је електронски регулатор који управља регулационим механизмом турбине. Успостављање жељеног протока се изводи ручно али је могуће и помоћу уређаја са даљинским успостављањем жељеног протока као и временски унапред програмирано настављање протока.

У системима ценовода под притиском се понекад захтева константан притисак. Тада се сувишна енергија може искористити у хидроагрегату који је истовремено и добар регулациони орган. При *регулацији притиска* се мери притисак на захтеваном

месту, манометром или сондом. Измерена вредност улази у електронски регулатор који поређењем измереног и жељеног притиска управља регулационим механизмом турбине. Код оваког начина регулације агрегат мора да ради паралелно са електричном мрежом.

Када се расположиви хидропотенцијал искоришћава са више агрегата и да се при томе захтева аутоматски рад хидроцентрале, регулација је сложенија. При раду на самосталној мрежи потребан је диспечер који распоређује потрошаче и води мрежу. Хидроцентрала може да ради аутоматски ако је прикључена паралелно на електричну мрежу. За оптимално искоришћење хидроенергије није најпогодније да сви агрегати раде паралелно под једнаким оптерећењем. То се односи на мање протоке, код којих је корист од *групе агрегата* мања од користи само једног агрегата.

Често се користе и агрегати са *нерегулационом турбином*, али и тада је могућа регулација брзине и нивоа.

За мање агрегате, снаге 30 kW, регулација се заснива на принципу распоређивања одређене константне снаге између самосталне мреже и додатног електричног оптерећења. Тада се као генератор може користити асинхрони мотор кратког споја са једноставном кондензаторском побудом.

Хидрауличке и енергетске карактеристике нерегулисане турбине могу се искористити за успостављање равнотеже између произведене и искоришћене снаге.

На самосталној мрежи довољно је да се регулише брзина агрегата, да би се постигла равнотежа између произведене и искоришћене снаге. При константној брзини, константно је и напрезање агрегата.

За агрегате, који раде паралелно са мрежом, регулише се ниво воде на улазу у турбину. Мерењем и одржавањем нивоа постиже се равнотежа између расположиве и произведене снаге тј. искоришћене снаге.

Нерегулисане турбине могу да раде без потешкоћа и на паралелној мрежи, ако им је проток довољно велики.

Ако је на располагању мала акумулација, такав рад може бити оптималан. Хидроагрегат ради на принципу све или ништа уз најбољи степен корисности. На тај начин врши се регулација нивоа а агрегат не зависи од променљивости протока.

Код агрегата који раде паралелно на мрежи, доста је значајно ручно регулисање агрегата. Промене протока су ретко нагле да би била потребна нека друга регулација осим ручне.

При регулацији малих агрегата битна је и заштита машина. Електрична заштита је једноставна, док је заштита турбина нешто сложенија. Основно је да се заштити турбина од неконтролисаног рада. Турбина растеређивањем агрегата повећава брзину обртања за 80 % или више, па уређаји за управљање морају се тако поставити да би се

омогућило затварање регулационог елемента турбине до полагаја празног хода или до потпуног заустављања агрегата.

Код нерегулисаних турбина, заштитни механизам мора да делује на затварање воде у доводном систему или на испуштање воде из система. Такође треба да се заштите лежаји који морају садржати термосонде за затварање при прекорачењу дозвољене температуре.

4.0 Преносни систем

Преносни систем се састоји од вратила турбине, вратила генератора, лежаја који подржавају та вратила, спојница које повезују вратила, и додатних вратила, лежаја, ременица, каишева, мењача или других компонената које имају улогу да промене брзину или смер обртања вратила. Функција преносног система је да пренесе снагу од турбине до генератора при чему се обезбеђује одређена брзина и смер обртања вратила генератора. [10]

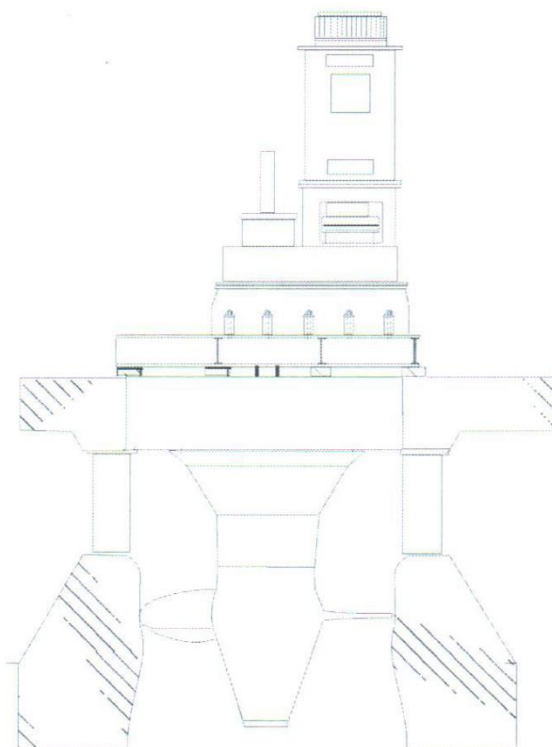
Када се вратило турбине обрће истом угаоном брзином коју захтева генератор и када могу да се турбина и генератор поставе тако да им вратила буду саосна, право решење представља директно везивање спојницом. [8]

Произвођач турбина даје препоруке за типове спојница који се могу користити (еластичне или круте).

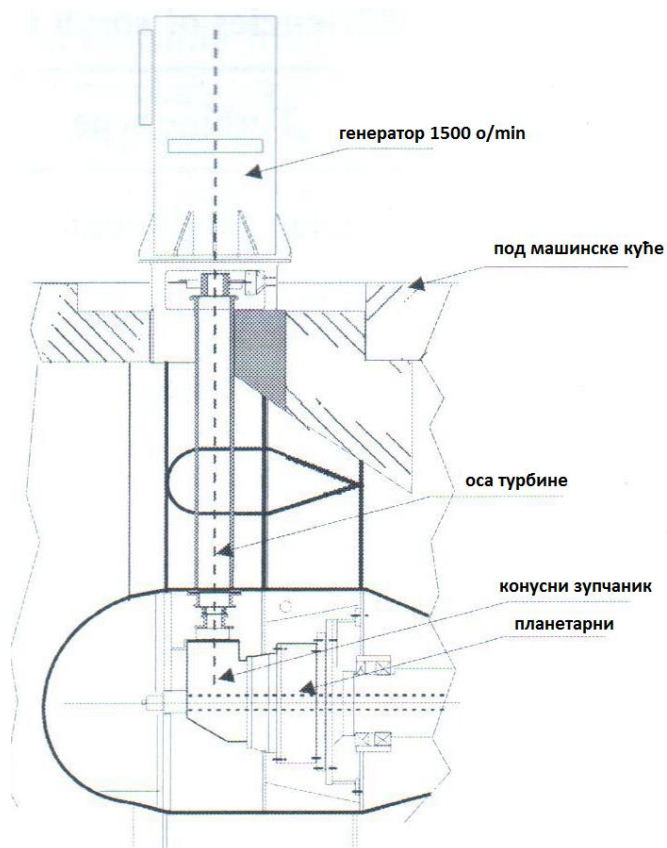
У појединим случајевима када турбина и генератор не раде истом брзином користе се мултипликатори, који се деле на основу типа коришћеног преносника на зупчaste и каишне.

Зупчaсти могу бити:

- Са хеликоидним зупчаницима (користе се у случају када су вратила паралелна, а посебно су погодни за постројење средње снаге) (слика 4.0.1),
- Са конусним зупчаницима (који се често користи у постројењима ниске снаге када су вратила турбине и генератора у равни једно у односу на друго. (слика 4.0.2).



Слика 4.0.1 - Мултипликатор са хеликоидним зупчаницима [8]



Слика 4.0.2 - Мултипликатор са конусним зупчаницима [8]

Каишни мултипликатори се најчешће користе у постројењима малих снага.

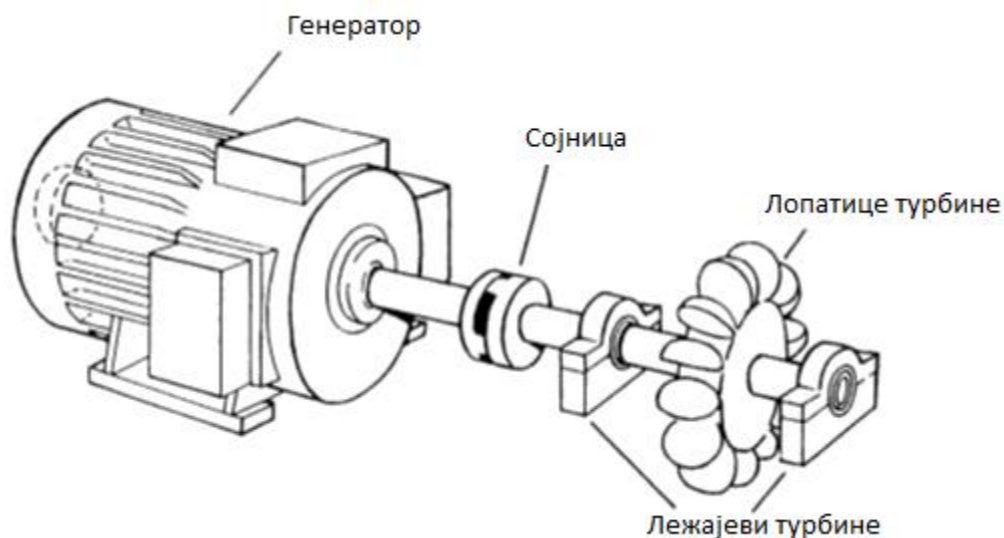
Постоји више могућих начина успостављања везе између вратила турбине и генератора. Без обзира на изабрани начин везивања, систем мора да буде димензионисан тако да може да пренесе потребно оптерећење.

Често набављане компоненте преносног система су лежаји и каишеви. Од апсолутног је значаја да су компоненте преносног система довољно снажне да имају дуг, беспрекоран живот. Оне морају да се монтирају правилно, и морају да имају одговарајуће одржавање у току сервисног живота. [10]

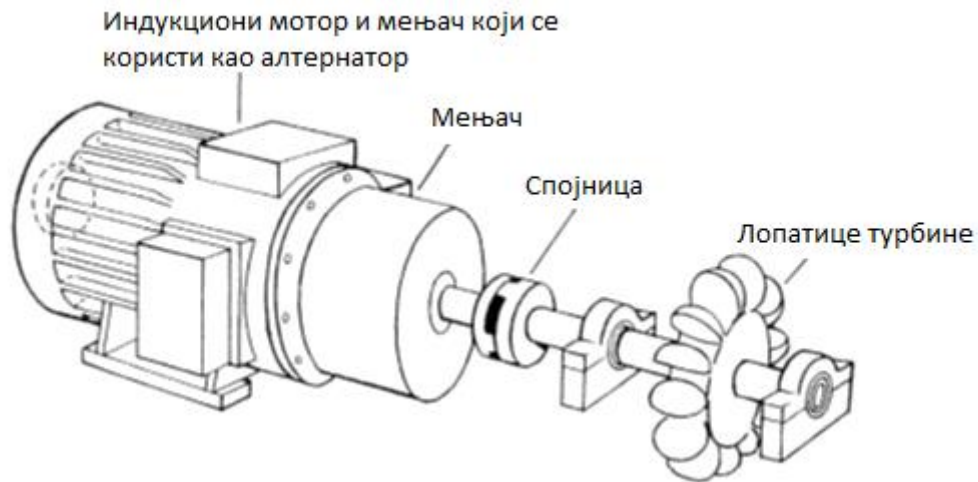
Сем помешних решења преноса, могу се користити и ланци и ланчаници, али је њихова примена изузетно ретка и ограничена на постројења малих снага.

4.1 Директно спојени преносник

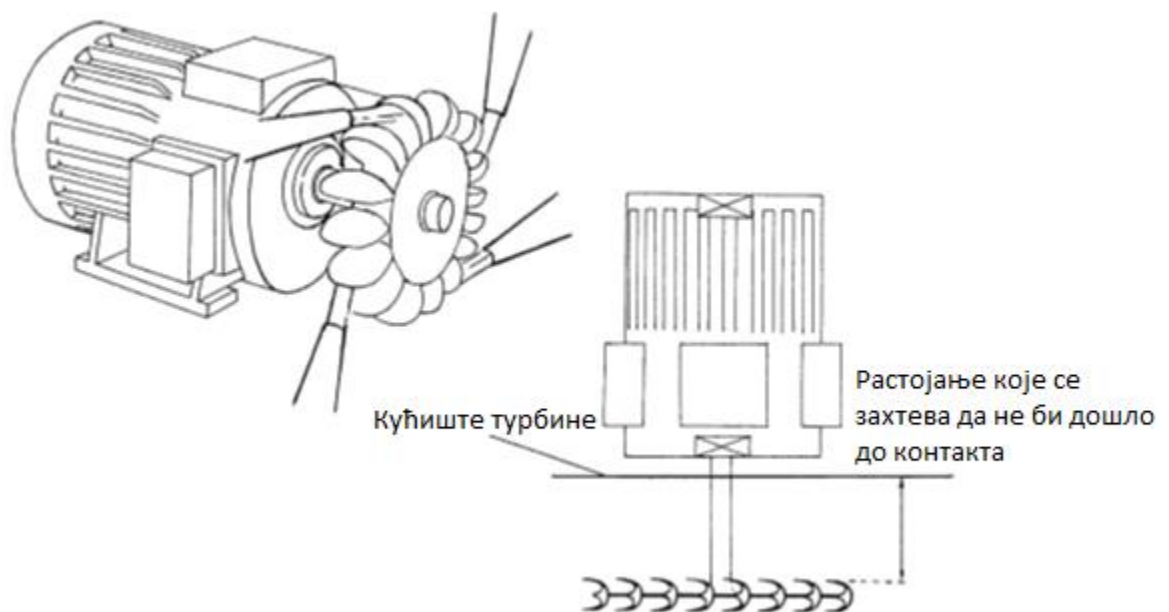
Директно спојени преносник је једноставно и ефикасно решење као што је приказано на сликама 4.1.1, 4.1.2 и 4.1.3. Значајна предност је што преносник не ствара додатно оптерећење на лежаје. Главни недостатак је немогућност промене брзине генератора и турбине. Мењач са одређеним односом поменутих брзина (слика 4.1.2) превазилази тај проблем. Директни преносник се лако одржава и, када се једном исправно постави, не захтева подешавања. Ово смањује трошкове везане за оспособљавање стручног особља за одржавање система. [10]



Слика 4.1.1 - Директно спојени преносни систем [10]

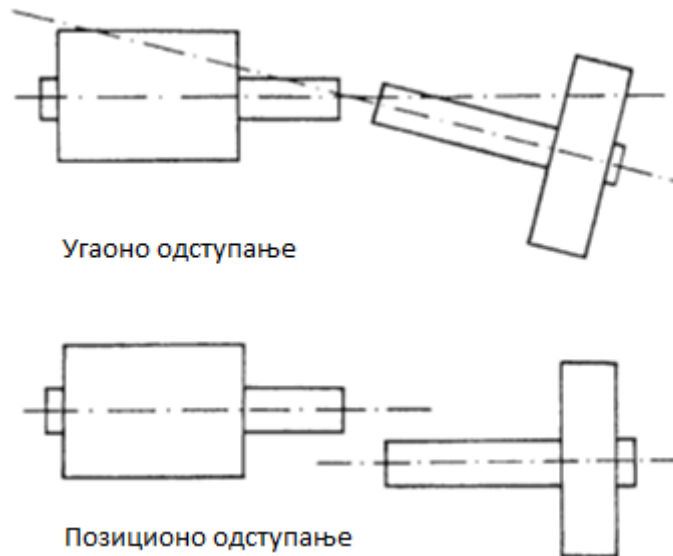


Слика 4.1.2 - Директно спојена турбина и зупчасти мотор, који се користи као алтернатор [10]



Слика 4.1.3 - Ротор турбине монтиран на вратилу генератора [10]

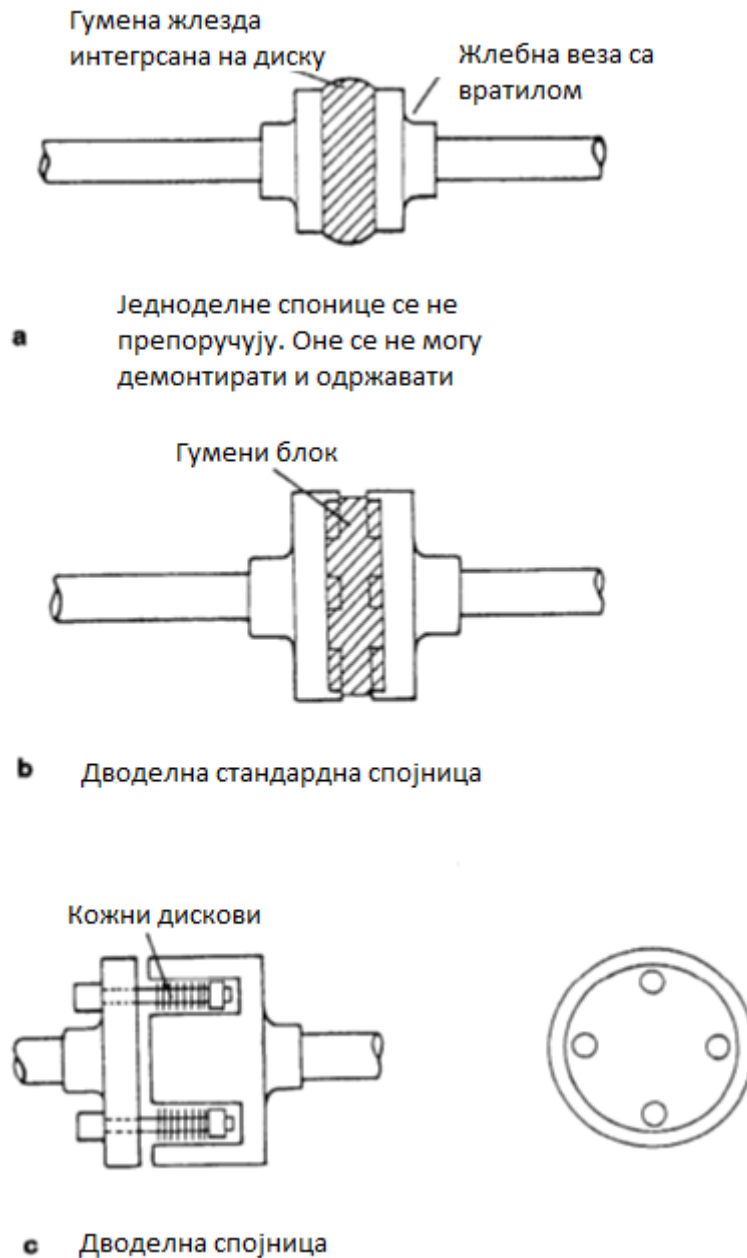
Приликом уградње, могу да се јаве угаона и позициона одступања саосности између два вратила (слика 4.1.4). Најчешће се јављају оба истовремено.



Слика 4.1.4 - Одступање [10]

Сваки покушај да се оваква два вратила повежу крутом спојницом доводи до савијања, узрокујући лом услед замора и изазивајући велика оптерећења на лежајима.

Како је прецизно поравнање вратила тешко оствариво, решење је да се користе флексибилне спојнице. Пример је дат на слици 4.1.5. Тип са слике (с) прихвата угаона одступања до 0.5° и позициона одступања до 0.25 mm.



Слика 4.1.5 - Флексибилне спојнице [10]

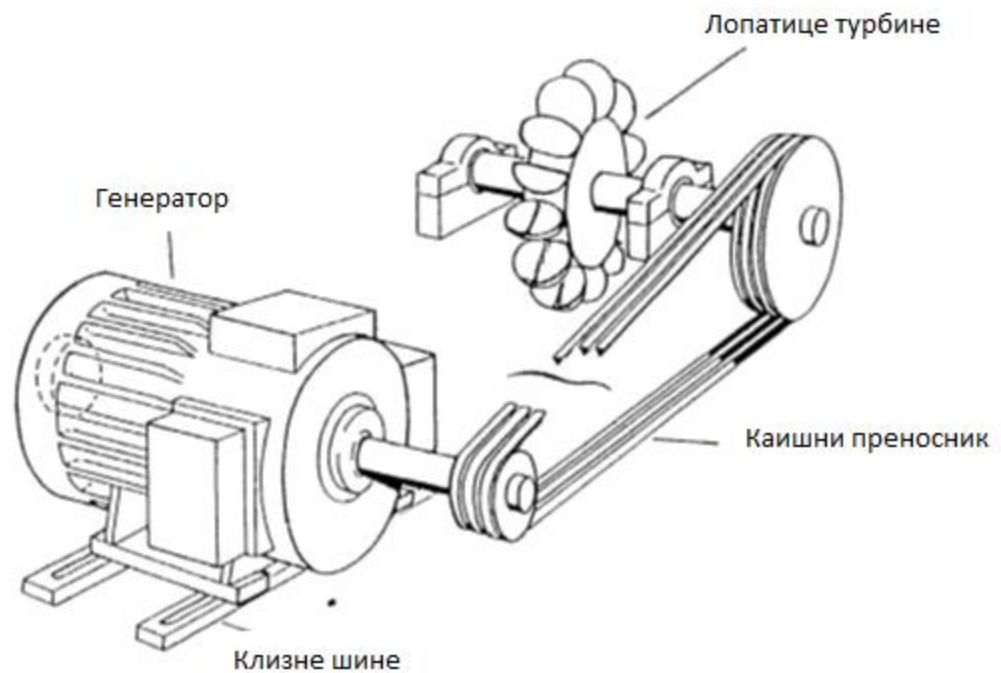
Веће грешке саосности ће изазвати смањену ефикасност и повећано хабање. Зато знатан напор треба уложити да грешке буду смањене на минимум.

Вратила се обично монтирају на два лежаја. Крутим везивањем два вратила крутим спојницама, добија се еквивалент једног вратила са четири лежаја. Четири лежаја никада не могу бити уравњена са довољном тачношћу и никада их не треба користити.

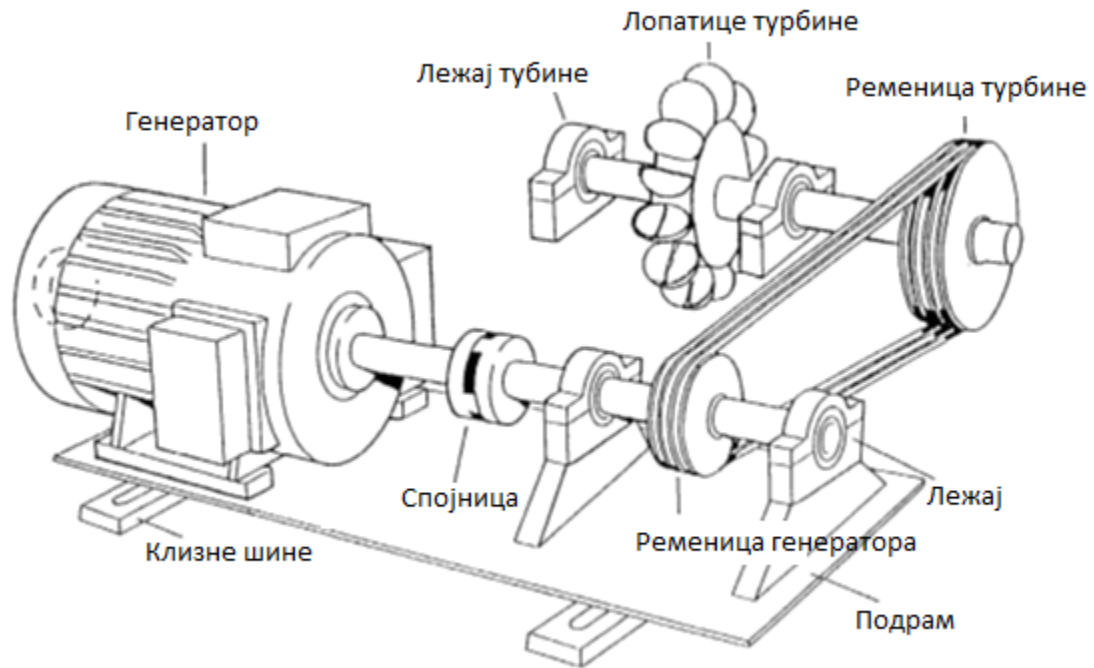
4.2 Каишни и ремени преносник

Турбина и генератор могу да се крећу различитим брзинама тако да сваки ради максималном ефикасношћу. Однос брзина се одржава коришћењем ременица (каишника) различитих пречника на вратилима турбине и генератора. [10]

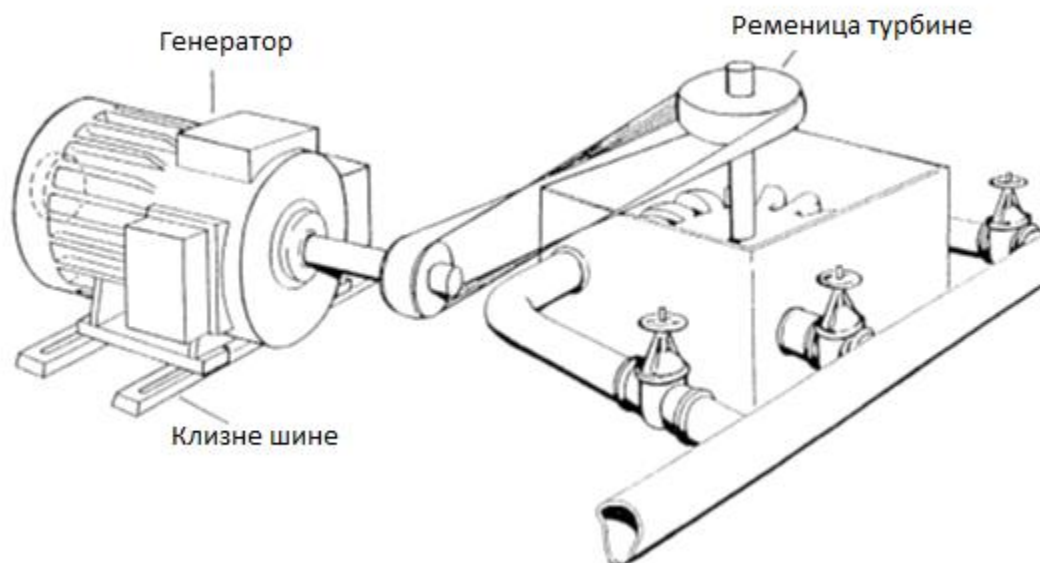
Обично је погодно да се генератор и турбина поставе у паралелним равнима, што је идеално за употребу каишног преносника (слика 4.2.1 и 4.2.2). Могу се користити и другачији случајеви уградње, на пример као на слици 4.2.3.



Слика 4.2.1 – Клинасти каишни преносни систем [10]



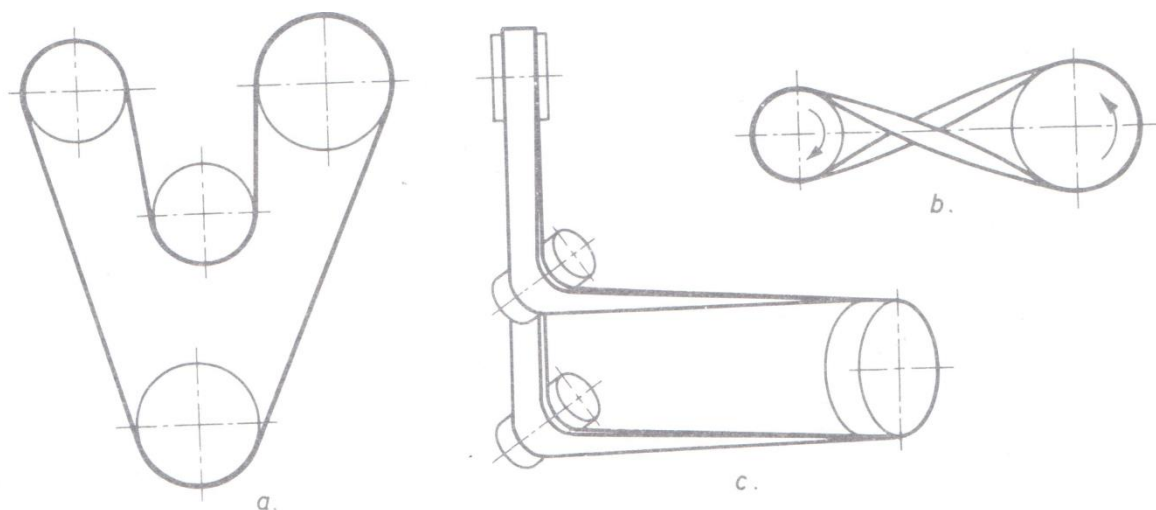
Слика 4.2.2 - Клинасти каишни преносни систем са додатним лежајима [10]



Слика 4.2.3 - Заокренути преносни систем [10]

Каишни и ремени парови преносе снагу помоћу отпора клизања између еластичних елемената правоугаоних пресека – каиша или трапезног пресека – ремена и точкова – каишника односно ременица. Ремени парови се примењују за вратила са паралелним осама, док се каишни парови могу примењивати не само на паралелним вратилима, као отворени парови ако су смерови обртања вратила исти, већ и као укрштени парови ако су потребни супротни смерови обртања вратила, или ако су

вратила мимоилазна. Каиши укрштених и мимоилазних парова изложени су увијању и имају врло неповољно напонско стање, па се примењују само изузетно. Помоћу каишних или ремених парова може се преносити снага и на више вратила. [12]



4.2.4 - Каишни парови; а) сложени, б) укрштени, с) мимоилазни [12]

Предност каишних и ремених парова у односу на друге је једноставност облика точкова, каиша и ремена, мали трошкови производње и одржавања, могућност преноса снаге између вратила већих осних одстојања, велика еластичност каиша и ремена, способност проклизавања при преоптерећењу.

Каишни и ремени парови се примењују за пренос мањих снага, при мањим угаоним брзинама.

Важно је да се каишеви одрже чистим и сувим зато што би уље или вода на каишу утицали на захват и могли би да изазову да каиш склизне. [10]

Правилно пројектовани модерни каишници могу да имају ефикасност од 95% до 97%. Погрешно напрезање каиша, лоше уравњавање или коришћење лоших компоненти могу да смање преносну ефикасност до 70%.

Да би се осигурала једнообразност и замењивост, произвођачи каишева користе стандард. Једино индустријски погонски стандард је релевантан за мале хидроелектране. Пољопривредни и аутомобилски стандард није погодан.

Две основне групе каишева су плџснати и трапезни каишеви, али свака група има варијације.

4.2.1 Пљоснати каишеви

Традиционални пљоснати каишеви су прављени од „балата“ коже, памука или платна. Ови материјали су релативно слаби, и димензионо нестабилни за различите временске услове, и имају низак коефицијент трења са ременицама. [10]

Слабост материјала значи да каишеви морају да буду дебели и широки. Дебели каишеви захтевају рад на каишнику са великим пречником. Широки каишеви намећу велика отерећења на лежаје кружних вратила и захтевају комплетно уређење са доданим вратилима, спојницама и лежајима. Низак коефицијент трења се превазилази наношењем лепљиве супстанце између каиша и каишника, што захтева вештину процењивања колико често и колико је потребно да се наноси.

Модерни пљоснати каишеви израђени од специјалних компоненти су снажнији, димензионо су прилагодљивији, и имају висок коефицијент трења са каишником. Каишеви се праве узимајући одговарајућу дужину материјала и везивањем крајева заједно. [10]

Снага и високи коефицијент трења могу да доведу до високе ефикасности преноса малих димензија намећући релативно ниско оптерећење на лежаје.

Било који тип пљоснатих каишева да се изабере, он мора да има неку вођицу да би се осигурално да не склизне са ременице.

4.2.2 Трапезни каишеви

Постоје два типа ових каишева, стари трапезни каишеви и скоро представљени клинасти каишеви. [10]

Клинасти каишеви су јачи и могу да се користе за све нове преноснике и за замену каишева на постојећим преносницима.

Неке врсте каишева су отпорне на пламен и антистатички су. Они се користе за опасна окружења и нису потребни за многе микрохидро шеме.

Трапезни и клинасти каишеви раде исто као и пљоснати каишеви, само што се они крећу по жлебастој ременици и захват је између конусних страна каишева и конусних страна жлебова.

Коефицијент трења за трапезне и клинасте каишеве је сличан као код пљоснатих каишева, али захват је три пута већи.

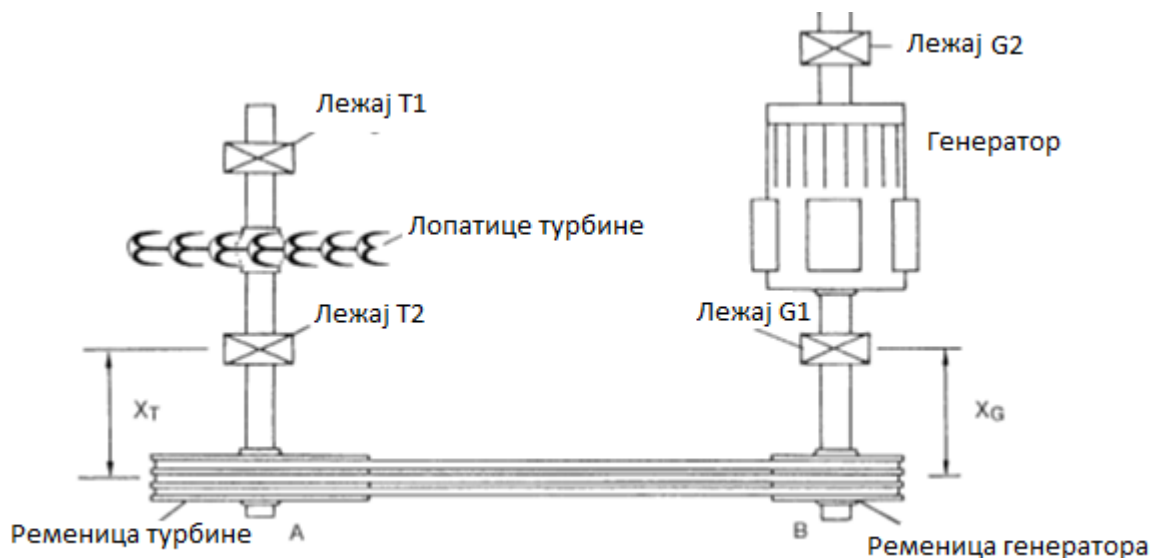
Ременице на трапезним и клинастим каишним преносницима морају се адекватно ускладити, у супротном јавиће се повећано трење са бочним странама, што резултује хабањем и прераним отказивањем преноса.

Неопходно је да се каишеви користе са ременицама које имају тачан облик и величину жлеба.

Трапезни или клинасти каишеви не смеју да буду већи од пречника ременице. То може озбиљно да оштети каиш и да изазове отказ. Често се обезбеђује центрично подешавање растојања или се уграђује маневрисана ременица. У оба случаја неопходно је да се обезбеди око 60 mm подешавање растојања.

4.2.3 Позиција ременице на вратилу

Затегнутост каиша одређује бочна оптерећења на вратилу, односно затегнутост каиша ствара радијално оптерећење на вратилу. Радијално оптерећење ствара момент који морају да прихвате лежаји који носе вратило. На слици 4.2.3.1 се види типичан распоред ременице на кружном вратилу. Растојања X_t и X_g морају да буду кратка да би се смањило оптерећење на лежаје.

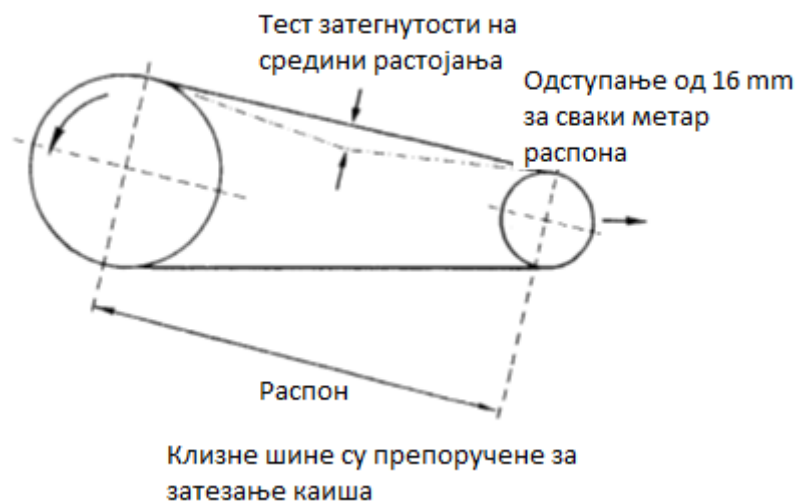


Слика 4.2.3.1 - Ременице на вратилу [10]

4.2.4 Методе затезања каиша

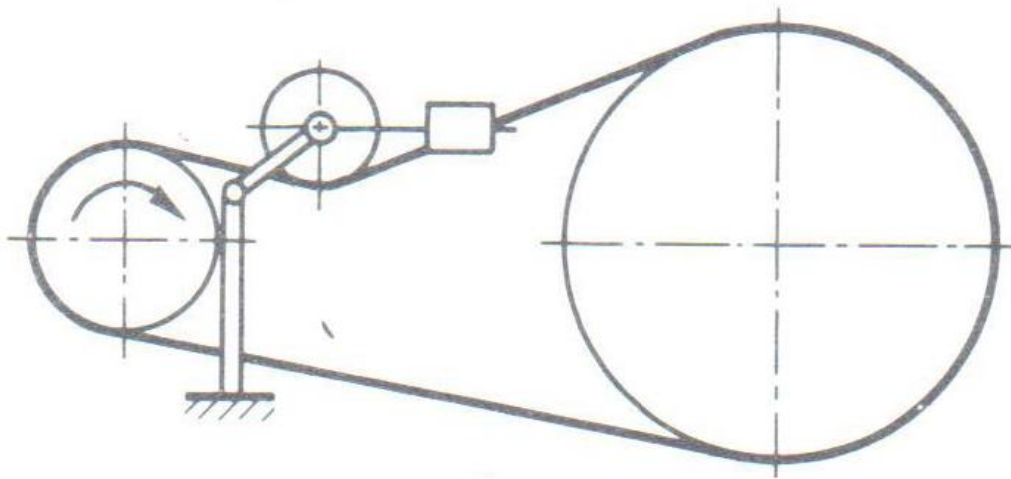
Најједноставнији начин да се затегну каишеви и да се обезбеди подешавање инсталације је да се користе клизајуће шине испод носача генератора. Турбина је фиксно повезана са цевоводном. Генератор се може померити зато што су електрични прикључци флексибилни. Клизајуће шине су већ инсталиране на сликама 4.2.1, 4.2.2 и 4.2.3. Тестирање затегнутости каиша је приказано на слици 4.2.4.1 .

Недостатак је што сила у огранцима по затезању мора бити знатно већа од потребне да би на крају периода између два притезања била још довољно велика да омогући пренос предвиђене снаге. [12]



Слика 4.2.4.1 - Тестирање затегнутости каиша [10]

Стална сила притезања може се остварити помоћу котура затезача којим се притискају каиши и ремени са спољне стране. Каиш или ремен се преко котура затезача савија супротно од смера савијања на точковима, те промене напона постају наизменичне, што доводи до знатног смањења издржљивости, односно смањења века каиша. Међутим, овим решењем се знатно повећавају обвојни углови на точковима, а самим тим и носивост каишних и ремених парова. Притисак котура затезача постиже се на доста једноставан начин помоћу тега, опруге и сл. 4.2.4.2 .



Слика 4.2.4.2 - Позиција котура затезача [18]

Овакав распоред није погодан за клинасте каишеве али је прихватљиво за пљоснате и трапезне каишеве. [10]

Пречник котура затезача треба да буде што је већи могући и никада мањи од пречника мале ременице преносника. Котури затезачи који раде изван преносника треба да буду обични (без жлебова или зубића).

Постављањем котура затезача у преносник елиминише се проблем супротног савијања каиша али се смањује лук контакта каиша на малој преносној ременици.

Монтажни котур затезач мора да буде пројектован да носи силу од око 100 N по каишу у случају клинастих каишева. За пљоснате каишеве ова сила треба да буде око 3 N по mm ширине каиша.

4.3 Прорачун каишних преносника

Полазни подаци:

- Снага P [KW]
- Број обртаја..... n_1 [min^{-1}]
- Преносни однос..... i
- Положај преносника:
- Преоптерћење..... [%].
- Пљоснати каиш
- Материјал каиша.....

Пречник мањег каишника се рачуна из односа d_1/h . Вредност h (дебљина каиша) се читава, према задатом материјалу, у литератури [13]. Пречник мањег каишника се стандардизује.

Пречник већег каишника се рачуна из израза:

$$d_2 = i * d_1 * \xi_k \quad (4.3.1)$$

где фактор проклизавања има вредност:

$$\xi_k = (0,98 \div 0,995) \quad (4.3.2)$$

Такође се пречник већег каишника (d_2) стандардизује.

Број обртаја већег каишника се рачуна по изразу:

$$n_2 = \frac{n_1}{i} \quad (4.3.3)$$

где се стварни преносни однос после стандардизације d_1 и d_2 рачуна из израза:

$$i = \frac{d_2}{d_1} * \frac{1}{\xi_k} \quad (4.3.4)$$

док је вредност обимне брзине мањег каишника дата изразом:

$$v = \frac{d_1 \cdot \pi \cdot n_1}{60} [m/s] \quad (4.3.5)$$

Приближно осно растојање је дато изразом:

$$a = (0.7 \div 2) \cdot (d_1 + d_2) \quad (4.3.6)$$

и усваја се цео број.

Обухватни углови се рачунају изразима:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 180^\circ - 2 \cdot \gamma \\ \beta_2 &= 180^\circ + 2 \cdot \gamma \\ \sin \gamma &= \frac{d_2 - d_1}{2 \cdot a} \end{aligned} \quad (4.3.7)$$

Вредност рачунске дужине каиша се израчунава изразом:

$$L_p = (d_1 + d_2) \cdot \frac{\pi}{2} + 2 \cdot a \cdot \cos \gamma + \frac{(d_2 - d_1) \cdot \pi \cdot \gamma}{180} \quad (4.3.8)$$

и ова вредност се стандардизује.

Стварно осно растојање је дато изразом:

$$a_s = 0,25 \cdot \left[L_p - \frac{\pi}{2} \cdot (d_1 + d_2) + \sqrt{\left[L_p - \frac{\pi}{2} \cdot (d_1 + d_2) \right]^2 - 2 \cdot (d_2 - d_1)^2} \right] \quad (4.3.9)$$

$$\begin{aligned} a_{\min} &= a_s - 0.015 \cdot L_p \\ a_{\max} &= a_s + 0.03 \cdot L_p \end{aligned} \quad (4.3.10)$$

Ширина каиша се рачуна обрасцем:

$$b = \frac{F_t \cdot C_A}{\sigma_k \cdot C_\alpha \cdot C_v \cdot C_o \cdot h} \quad (4.3.11)$$

и ова вредност се стандардизује.

Вредност дозвољеног напона (σ_k) може се наћи у литератури [13]. Остале вредности потребне за прорачун ширине каиша се узимају из табела Т 4.3.1. – Т 4.3.4.

Т 4.3.1. Фактор удара C_A

Ред. бр.	Променљивост радног оптерећења	Погон	
		лакши	тежи
1	Лаки спектар оптерећења: Турбопумпе и компресори, тракасти транспортери за лаке материјале, вентилатори и пумпе до 7,5 kW, стругови и брусилице равномерно распоређени.	1,0	1,1
2	Средњи спектар оптерећења: Ланчани и тракасти транспортери, алатне машине, пресе, маказе за лим, електрични генератори, машине за гњечење, штампарске машине, вентилатори и пумпе преко 7,5 kW.	1,1	1,2
3	Тежак спектар оптерећења: Мање оптерећени млинови, клипни компресори и пумпе, пужни транспортери и транспортери са кофицама, дизалице, текстилне машине, машине за хартију, тестере, гатери, ексцентар пресе добро уравнотежене.	1,2	1,4
4	Врло тежак спектар оптерећења: Јако оптерећени млинови, дробилице, колендери, мешалице, витла, кранови, багери, ваљаонички станови.	1,3	1,5
Под лаким погоном се подразумевају електромотори са нормалним полазним моментом $T_{\max} / T \leq 2$, мотори са унутрашњим сагоревањем и турбине са $n > 600 \text{ min}^{-1}$, а тешки погон за електромоторе са $T_{\max} / T > 2$ и мотори са унутрашњим сагоревањем и турбине до $n < 600 \text{ min}^{-1}$.			

Т 4.3.2. Фактор обвојног угла C_β

Врсте каиша	Обвојни угао β°													
	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200	210
Каиш									0,91	0,94	0,97	1	1,1	1,2
Ремен	0,56	0,62	0,68	0,73	0,78	0,82	0,86	0,89	0,82	,95	0,98	1	-	-

Т 4.3.3. Фактор обимне брзине C_v

Брзина каиша v , m/s	1	5	10	15	20	25
Фактор брзине C_v	1,04	1,03	1	0,95	0,88	0,79

Т 4.3.4. Фактор положаја преносника C_o

Преносник	Угао нагиба преносника према хоризонталу		
	0-60°	60°-80°	80°-90°
Отворени	1	0,9	0,8
Укрштени	0,9	0,8	0,7
Полуукрштени	0,8	0,7	0,6
Напомена: За преноснике са аутоматским затезањем каиша и за трапезне каише $c_o=1$			

Док се вредност обимне силе рачуна преко обрасца:

$$F_t = T_1 / r_1 = 2 \cdot T_1 / d_1 \quad (4.3.12)$$

Ширина каишника је у функцији ширине каиша а вредности се могу наћи у литератури [13].

Учесталост промене напона савијања се рачуна из обрасца:

$$f_s = \frac{x \cdot v}{L_p} [s^{-1}] \quad (4.3.13)$$

где x представља број савијања и једнак је броју каишника око којих је каиш обавијен.

Оптерећење каишника и каиша одређују сила притезања, сила у слободном делу каиша, сила у вучном делу каиша и сила притиска на вратило.

Потребна сила притезања се рачуна по обрасцу:

$$F_p = S_\mu \cdot C_A \cdot \frac{F_t}{2} \cdot \frac{e^{\mu\beta_1} + 1}{e^{\mu\beta_1} - 1} \quad (4.3.14)$$

где $S_\mu = 1,1 \dots 1,2$ представља степен сигурности против проклизавања а μ коефицијент отпора клизању, који се може наћи у литератури [13].

Сила у слободном делу каиша се рачуна по обрасцу:

$$F_2 = F_t \cdot C_A \cdot S_\mu \cdot \frac{1}{e^{\mu\beta_1} - 1} \quad (4.3.15)$$

где β_1 представља обвојни (обухватни) угао у радијанима .

Вредност силе у вучном делу каиша се рачуна преко обрасца:

$$F_1 = F_t \cdot C_A \cdot S_\mu \cdot \frac{e^{\mu\beta_1}}{e^{\mu\beta_1} - 1} \quad (4.3.16)$$

$$\text{Провера се може извршити на овај начин: } F_1 - F_2 = F_t \cdot S_\mu \cdot C_A \quad (4.3.17)$$

Сила притиска на вратило се рачуна преко обрасца:

$$F_R = S_\mu \cdot C_A \cdot F_t \cdot \frac{e^{\mu\beta_1} + 1}{e^{\mu\beta_1} - 1} \cdot \cos \gamma \quad (4.3.18)$$

Напони у каишу су максимални напон на мањем каишнику, напон услед притезања – затезања, услед центрифугалне силе и услед савијања око каишника.

Максимални напон на мањем каишнику се рачуна из обрасца:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_c + \sigma_{s1} \quad (4.3.19)$$

Напон услед силе притезања-затезања дат је изразом:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_1} \quad (4.3.20)$$

где A_1 представља површину попречног пресека каиша одређену из обрасца $A_1 = b \cdot h$.

Напон услед силе F_1 – затезање је дат изразом:

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_1} \quad (4.3.21)$$

А напон услед силе F_2 – затезања:

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_1} \quad (4.3.22)$$

Услед центрифугалне силе F_c , напон се рачуна:

$$\sigma_c = \rho \cdot v^2 \cdot 10^{-6} \quad (4.3.23)$$

где је ρ густина која се може наћи у литератури [13].

Напон услед савијања око каишника је дат изразом:

$$\sigma_{s1} = \frac{E_s \cdot h}{d_1}, \quad \sigma_{s2} = \frac{E_s \cdot h}{d_2} \quad (4.3.24)$$

а E_s је модул еластичности при савијању и може се наћи у литератури [13]. Да би се извршила провера носивости каиша, користи се израз:

$$\sigma_k \cdot C_\beta \cdot C_v \cdot C_O \cdot C_\mu \cdot C_{R\sigma} \geq \frac{F_t \cdot C_A}{A} \quad (4.3.25)$$

а вредност $C_{R\sigma}$ представља фактор утицаја променљивости обртног момента, и он узима следеће вредности:

- $C_{R\sigma} = 1 \div 1,1$ за велико учешће
- $C_{R\sigma} = 1,1 \div 1,25$ за средње учешће
- $C_{R\sigma} = 1,25 \div 1,4$ за мало учешће.

C_μ је фактор утицаја околине и он има вредност:

- $C_\mu = 1$ за сув ваздух и нормалну температуру
- $C_\mu = 0,9$ за околину пуну влаге и прашине

- $C_\mu=0,8$ за околину са уљним капима и маглом

Провера радног века каишног преносника се рачуна преко израза:

$$t = \frac{N_0 \cdot C_s \cdot C_{RN}}{f_s} \cdot \left(\frac{\sigma_{NO}}{\sigma_{\max}} \right)^m \quad (4.3.26)$$

где је $C_{RN}=1....1,2$ за велико учешће максималног обртног момента, док се вредности C_s и σ_{NO} узимају из табела Т 4.3.5. и Т 4.3.6.

Т 4.3.5. Фактор утицаја савијања на издржљивост C_s

u	1	1.25	1.4	1.6	1.8	2	3	4
За каише	1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
За ремене*	1	1,3÷1,6	1,4÷1,8	1,5÷1,9	1,6÷1,95	1,7÷2	1,8÷2	1,9÷2
* мање вредности за веће односе $\sigma_1 : \sigma_{s1} = 2 \div 2,5$, а веће за мање односе $\sigma_1 : \sigma_{s1} = 0,5 \div 1$								

Т 4.3.6. Динамичка издржљивост каиша σ_{NO}

Редни број*	Врсте еластичних елемената	σ_{NO} N/mm^2	N_0	M
1	Кожни стандардни каиш	2...3	10^7	5
2	Кожни каиш савитљив	3...6	10^7	5
3	Каиш гумени са арматуром од памучне тканине	6...9 7,5	10^7	4,5...7,5 6
6	Каиш памучни савитљив	3...4	10^7	4...16
7	Каиш од полиамида	30...60**	10^7	4...16
8 и 9	Вишеслојни са вучном траком од полиамида	50...80**	10^7	12...14
	Ремени (трапезни каиш)	6...9 7,5	10^7	6...11 8
* Редни број материјала				
** Мање вредности за веће пресеке.				

4.4 Лежаји

Основна улога лежаја је да пренесе оптерећење, са покретних на непокретене делове машине и да обезбеди услове за релативно кретање обртних делова. Лежаји преносе само силе, а не и обртне моменте. [13]

Функција лежаја је да омогући вратилу да се окреће слободно са малим коефицијентом трења и у исто време да држе вратило у правилном положају иако на вратило делују силе. [10]

Две главне врсте лежаја су клизни и котрљајни лежаји.

4.4.1 Клизни лежаји

Код клизних лежаја међусобна покретљивост делова у додиру и преношење оптерећења остварује се посредством клизања, када покретна површина клиза по непокретној површини лежишта. [13]

Клизни лежаји захтевају правилно подмазивање и адекватно одржавање. Они се обично не користе за мале хидроелектране. [10]

4.4.2 Котрљајни лежаји

Котрљајни лежаји су стандардни елементи и производе се у специјализованим фабрикама. Стандардом су прописани облици, мере, називи, начин одржавања, материјал, квалитет, начин контроле, уградња итд. Све карактеристике лежаја су дате у каталозима из којих конструктор, према радним условима и другим захтевима, врши избор лежаја. [13]

Котрљајни лежаји се састоје из прстенова или колUTOва, котрљајних тела и кавеза. Котрљајна тела су смештена између спољашњег и унутрашњег прстена, код прстенастих лежаја, тј. између колUTOва код колутних лежаја.

У прстеновима и колUTOвима урађени су жлебови по којима се крећу котрљајна тела.

Прстенови, колUTOви и котрљајна тела се израђују од челика легираног хромом, док се кавези најчешће израђују од челичног лима, лаких метала, полиамида, фенопласта итд.

Котрљајна тела могу бити у облику куглица, цилиндричних ваљака, конуса, заобљених ваљака итд. Котрљајна тела су смештена у одговарајуће кавезе.

Кавез спречава међусобни додир котрљајних тела и одржава њихово растојање.



Слика 4.4.2.1 - Котрљајни лежај⁵

4.4.3 Избор лежаја

Избор лежаја се врши на основу задатих услова: оптерећења, броја обртаја, века трајања итд. Прво се бира тип котрљајног лежаја. [13]

Основа за прорачун је моћ ношења лежаја и то:

- Динамичка моћ ношења, када је број обртаја већи од 10 мин⁻¹, а оптерећење константног правца, интензитета и смера, као и код лежаја изложених променљивом напрезању,
- Статичка моћ ношења, када лежај мирује или лагано осцилује ($n > 10 \text{ min}^{-1}$).

Динамичка моћ ношења лежаја представља оптерећење константног правца и интензитета које лежај преноси и при коме најмање 90% испитаних лежаја оствари 10^6 обртаја без појаве оштећења. Вредности за динамичку моћ ношења може се наћи у литератури [13].

Динамичка носивост лежаја је дата изразом:

$$C \geq \frac{F}{k_t} \cdot \sqrt[n]{\frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6}} \quad (4.4.3.1)$$

⁵ Преузето са <http://www.yellowpages.rs/sr/rolteki-kotrljajuci-lezajevi/1-10-208-56345/11415/slika>

при константном интензитету еквивалентног оптерећења F , константном броју обртаја n (непроменљиви радни услови) и номиналном радном веку лежаја L_h . С друге стране при променљивим радним условима, динамичка носивост може да се одреди према:

$$C \geq \frac{1}{k_t} \cdot \sqrt[\alpha]{\frac{60 \cdot L_h}{10^6} \cdot \sum_i \left[n_i \cdot F_i^\alpha \cdot \left(\frac{t_i}{L_h} \right) \right]} \quad (4.4.3.2)$$

где је:

$$F = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (4.4.3.3)$$

представља еквивалентно оптерећење, а вредности из овог израза су:

- F_r - стварно резултујуће радијално оптерећење у ослонцу
- F_a - стварно резултујуће аксијално оптерећење у ослонцу
- X -коэффициент радијалног оптерећења
- Y - коэффициент аксијалног оптерећења
- t_i - временски интервал

Вредности коефицијената X , Y зависе од типа и величине лежаја као и односа величине аксијане и радијалне компоненте оптерећења и могу се наћи у литератури [13].

K_t представља фактор температуре, а вредности су му дате у табели Т 4.4.3.1.

Т 4.4.3.1. *Фактор температуре* K_t

t (°C)	100	150	200	250	300
k_t	1,0	1,0	0,9	0,75	0,6

L_h је номинални радни век лежаја и рачуна се по обрасцу:

$$L_h = \left(\frac{C}{F} \right)^\alpha \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (4.4.3.4)$$

α је експонент који зависи од облика котрљајног тела и узима вредности:

- $\alpha = 3$ за лежаје са куглицама

- $\alpha = 10/3$ за лежаје са ваљцима

Статичка моћ ношења представља оптерећење које на месту додира изазива пластичну деформацију. Вредности за статичку моћ ношења лежаја могу се наћи у литератури [13].

Статичка носивост лежаја се утврђује изразом:

$$C_0 = k_0 \cdot F_0 \quad (4.4.3.5)$$

где k_0 представља статички фактор сигурности, а усваја се у следећим границама:

- $k_0 = 0,5 \dots 1$ за равномеран рад без вибрација
- $k_0 = 1 \dots 1,5$ за нормалне услове рада
- $k_0 = 1,5 \dots 2,5$ за велика ударна оптерећења
- $k_0 \geq 4$ за аксијалне осетљиве лежаје

Еквивалентно оптерећење је дато изразом:

$$F_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a \quad (4.4.3.6)$$

4.5 Димензионисање вратила

Вратило турбине преноси ротационо кретање радног кола турбине на генератор уз помоћ преносног система. У већини случајева вратило је кружног попречног пресека и изложено је или чистом увијању (торзији) или комбинацији увијања и савијања. [10]

Директно везивање пумпног и турбинског вратила МХЕ (спојницом), даће као резултат чисто торзионо оптерећење. Каишни преносни системи резултирају торзијом и савијањем (слика 4.5.1).

Одговарајући поступак прорачуна вратила одабира се према томе како је вратило стварно оптерећено у посматраном пресеку. Момент савијања M у вратилу узрокује нормално напрезање на савијање, а обртни момент T_t тангенцијално торзионо напрезање. Због тога приликом димензионисања вратила, на месту где истовремено делују оба напрезања, одлучиће еквивалентно напрезање M_i , према изразу: [14]

$$\sigma_i = \frac{M_i}{W} \leq \sigma_{sdoz} \quad (4.5.1)$$

где је:

W – отпорни момент и за кружни попречни пресек се рачуна по обрасцу:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$M_i = \sqrt{M^2 + \left(\frac{\sigma_{DS(-1)}}{\tau_{Dt(0)}} \cdot \frac{T_t}{2} \right)^2} \quad (4.5.2)$$

еквивалентни момент у произвољном пресеку вратила, при сложенем напрезању. А вредности из овог израза су:

- T_t - момент увијања
- $\sigma_{DS(-1)}$ - динамичка издржљивост материјала вратила при чисто наизменично променљивом напрезању на савијање
- $\tau_{Dt(0)}$ - динамичка издржљивост материјала вратила при чисто једносмерно променљивом напрезању на увијање

Идеални пречник пуног вратила кружног попречног пресека рачуна се:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{32M_i}{\pi\sigma_{sdoz}}} \approx \sqrt[3]{\frac{10M_i}{\sigma_{sdoz}}} \quad (4.5.3)$$

Код пуних вратила кружног попречног пресека напон за увијање дат је изразом:

$$\tau_t = \frac{T_t}{W_p} = \frac{16T_t}{d^3\pi} \leq \tau_{doz} \quad (4.5.4)$$

Одатле следи израз за пречник вратила:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16T_t}{\pi\tau_{diz}}} \approx \sqrt[3]{\frac{5T_t}{\tau_{doz}}} ; \tau_{doz} = \frac{\tau_{Dt(0)}}{K \cdot S} \quad (4.5.5)$$

где је степен сигурности $S=1,5.....2,5$

Вредности фактора K усвајају се из табеле Т 4.5.1.

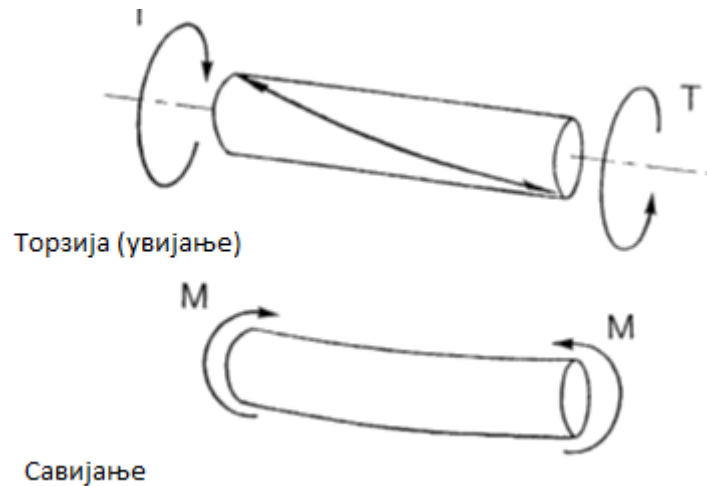
Т 4.5.1. Вредност фактора K

Облик вратила и пресека	Затезана чврстоћа R_m , N/mm ²	
	<700	>700
Глатко	1	1,25
На местима промене пречника	1,5 – 2,1	1,8 – 2,6
Са жлебом по обиму вратила	2,0 – 2,2	2,0 – 2,6
Са попречним отвором кружног пресека	1,6 – 2,0	1,8 – 2,2
Са жлебом за клин	2,0 – 2,4	2,2 – 2,6
Ожлебљено вратило са правим блоковима	1,6 – 1,8	1,8 – 2,0
На местима са навојем	1,5 – 1,9	1,8 – 2,2
Спој са обртним деловима са чврстим налегањем	2,4 – 3,0	2,8 – 3,6
Спој са обртним деловима са неизвесним налегањем	1,8 – 2,4	2,0 – 2,6
Спој са деловима са лабавим налегањем	1,2 – 1,8	1,6 – 2,0
Веће вредности K треба узимати за веће и наглије промене пресека, за веће преклопе, за веће пречнике вратила, за материјале са већом чврстоћом и грубље обрађене површине.		

Прорачуната вредност пречника се усклађује са првом ближом стандардном вредношћу, према табели Т 4.5.2.

Т 4.5.2. Стандардни пречници вратила d , mm

1	4,5	17	38	85	190	420	950
1,1	5	18	40	90	200	450	1000
1,2	5,5	19	42	95	210	480	1060
1,4	6	20	45	100	220	500	1120
1,5	7	21	48	105	240	530	1180
1,6	8	22	50	110	250	560	1250
1,8	9	24	52	120	260	600	1320
2	10	25	56	125	280	630	1400
2,2	11	26	60	130	300	670	1500
2,5	12	28	63	140	315	710	1600
2,8	13	30	68	150	330	750	1700
3	14	32	70	160	355	800	1800
3,5	15	34	75	170	380	850	1900
4	16	36	80	180	400	900	2000



Слика 4.5.1 – Торзија и савијање [10]

Ако вратило није добро димензионисано, може да откаже услед замора или статичког оптерећења. На пример, напони услед савијања изазваће стварање површинских прскотина услед замора, које ће да изазову фаталне отказе. [10]

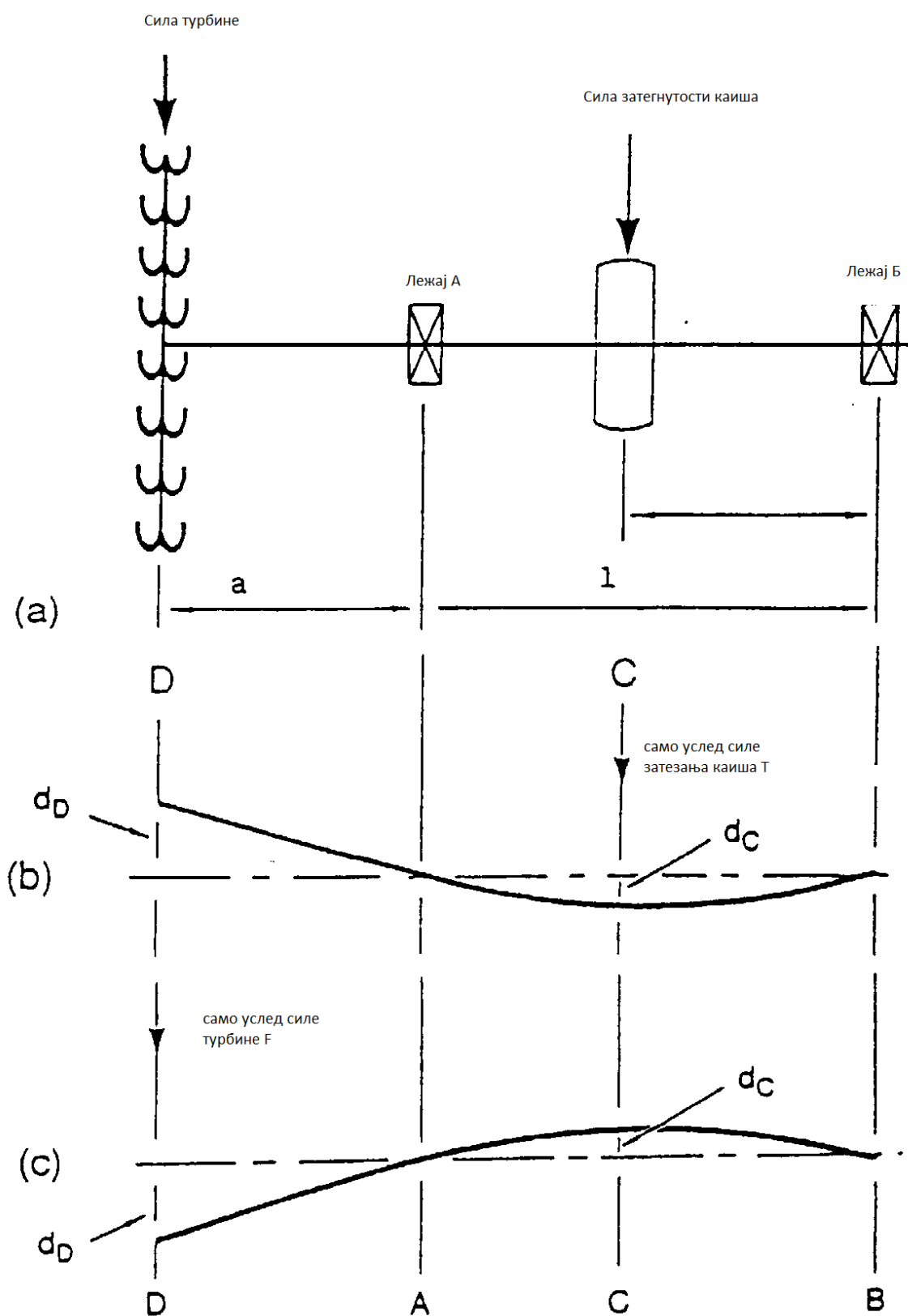
Где год је могуће, елементи за пренос снаге (као што су ременице и зупчаници) морају да буду смештени близу носећих лежаја да би се смањила оптерећења услед савијања.

За максимално дозвољени угиб вратила се узима 0,0005 пута растојање између лежаја.

За нагиб вратила дозвољене деформације су:

- $\text{tg } \alpha \approx 0,001$ – крути котрљајни и подесиви клизни лежаји,
- $\text{tg } \alpha \approx 0,0003$ – подесиви клизни лежаји. [13]

За одређивање угиба и нагиба вратила примењују се методе Отпорности материјала.



Слика 4.5.2 – Угиб вратила [10]

5.0 Генератори у МХЕ

Генератори су ротационе електричне машине које механичку енергију погонског уређаја претварају у електричну енергију. Састоје се од покретног дела (ротора) и од непокретног дела (статора). Према врсти електричне струје коју производе, могу бити генератори једносмерне или наизменичне струје.

Генератори који се користе у малим хидроелектранама морају да задовоље ове услове:

- да омогуће покретачима квалитетно напајање електричном енергијом, уз напон који не одступа више од $\pm 3-5\%$ у односу на номинални напон генератора,
- да поседује напонски регулатор који је у стању да спречи пораст напона на недозвољену вредност у прелазним режимима,
- да буду такви да струјни удар величине номиналне струје не изазива већи динамички пад напона,
- да конструкција буде таква да генератор без оштећења издржи побег од 200 % минималне брзине обртаја. [5]

Генератори једносмерне струје ниског напона се користе само код хидроелектрана мале снаге (снаге испод 2 kW) у случају када се напајају акумулатори.

Предности система са наизменичном струјом су:

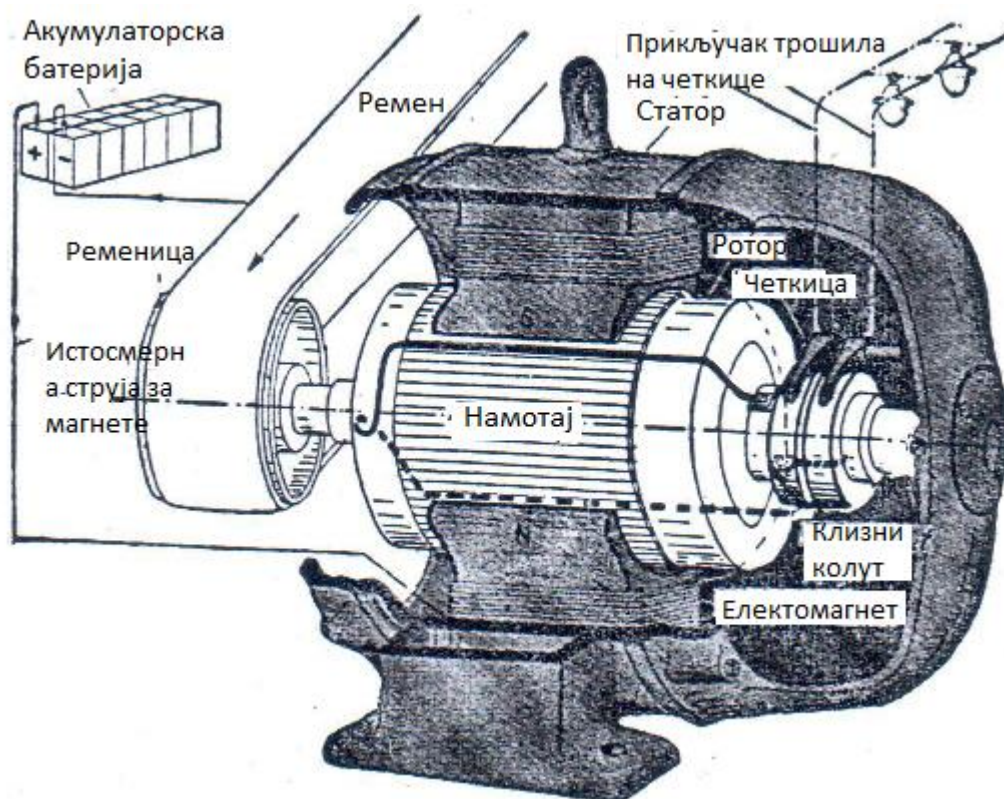
1. Практично сви национални системи за снабдевање електричном енергијом су са наизменичном струјом, па се различити типови електричних уређаја производе у великом броју и јефтини су за овакве системе.
2. Синхрони генератори и асинхрони (индукциони) генератори се производе у великом броју, и јефтинији су од генератора једносмерне струје.
3. Трансформатори се могу користити да промене мрежни напон лако и јефтино, како би се губици у преносу на даљину могли смањити коришћењем далековода високог напона.
4. Прекид струје је лакши него код једносмерне струје па су и прекидачи јефтинији. [10]

Недостаци система са наизменичном струјом:

1. Фреквенција система мора да се одржи константном у задатим границама, посебно ако се произведена електрична енергија користи за покретање индукционих мотора. То захтева употребу неког система за контролу брзине уз напонски регулатор.
2. Директно складиштење енергије није могуће као у случају коришћења акумулатора у системима једносмерне струје.

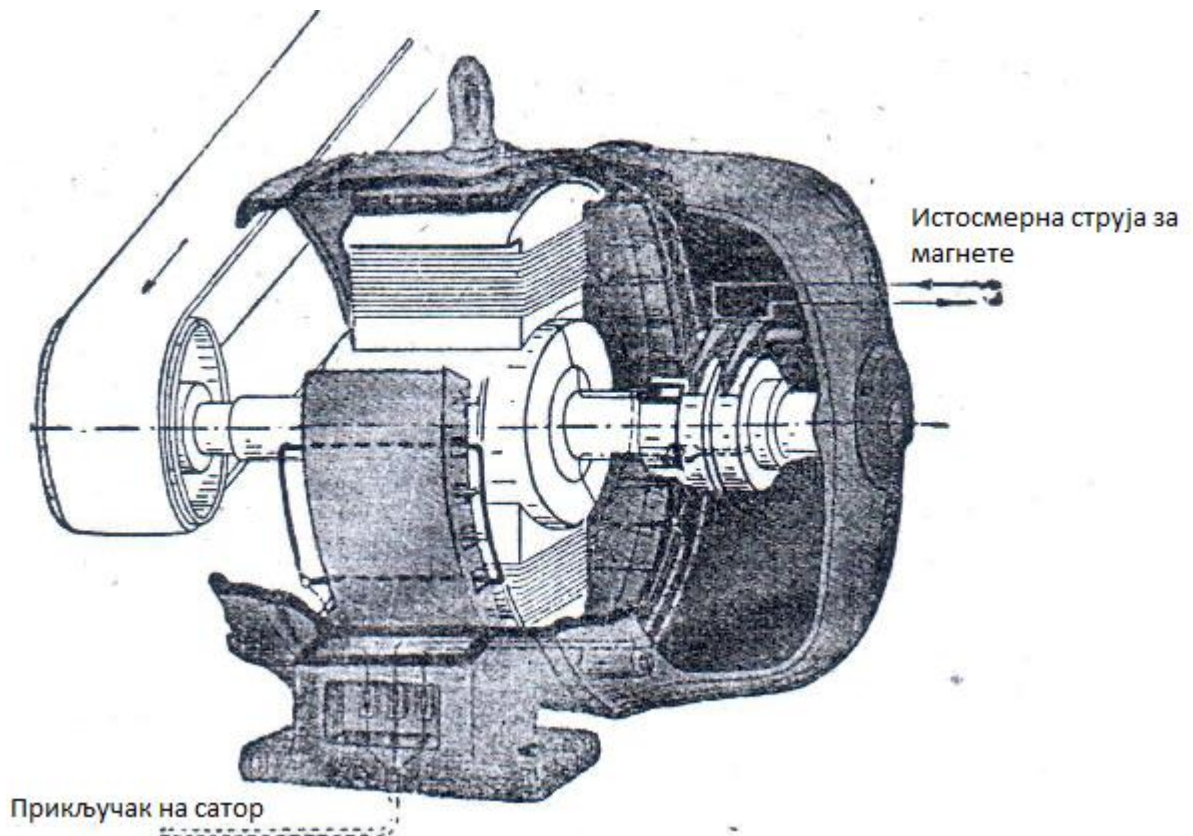
Генератор наизменичне струје има многе предности па је самим тим и јасан избор за мале хидроелектране.

Рад генератора наизменичне струје заснива се на електромагнетној индукцији. [16] На слици 5.0.1 је приказана шема једноставног генератора наизменичне струје. Као магнет користи се електромагнет који струју добија из акумулаторске батерије. Магнет је непомичан и представља статор. Погонски уређај покреће ротор преко ремена и ременице тако да се намотај ротора окреће у магнетном пољу магнета. У намотају се индукује електромоторна сила, која преко клизних колутава и четкица може дати струју. [15]



Слика 5.0.1 - Генератор наизменичне струје са магнетима на статору [15]

За производњу наизменичне струје потребно је да намотај у којем се индукује електромоторна сила сече магнетске линије магнета. Тако магнет може бити непомичан, а намотај може да се окреће између његових полова, као на слици 5.0.1. Међутим може бити и обрнуто, да намотај буде смештен у статору а магнет на ротору (слика 5.0.2). У том случају магнет добија струју преко клизних колутова. Из конструктивних разлога знатно је повољније решење као на слици 5.0.2, па се из тог разлога данас већи број генератора праве тако да магнет ротира, док је главни намотај непомичан.



Слика 5.0.2 - Генератор наизменичне струје са магнетима на ротору [15]

Генератори наизменичне струје могу бити једнофазни или трофазни. Предности једних и других генератора приказане су у табели Т 5.0.1.

Т 5.0.1. Предности једнофазних и трофазних генератора

Једнофазни	Трофазни
Мање компликовани електрични водови, изолација и прекидачи.	Уштеда на бакарном проводнику је до 75% у поређењу са једнофазним генератором једносмерне струје истог напона.
Монофазни електронски контролери оптерећења су мање скупи.	Јефтинији генератори и мотори; трофазни генератори и индукциони мотори су чешћи и јефтинији од монофазних еквивалената од преко 5 kW.
Величина генератора одређена је максималним захтеваним оптерећењем. У трофазном систему било би неопходно да се инсталира генератор већег капацитета од укупног максималног захтеваног оптерећења.	Трофазни генератори су мањи за задату излазну снагу од њихових монофазних еквивалената.

У пракси, одлука о усвајању монофазног или трофазног система зависи од набавке и коришћења генератора. По правилу код система до 10 kW бира се једнофазни генератор, а код система преко 5 kW трофазни. [10]

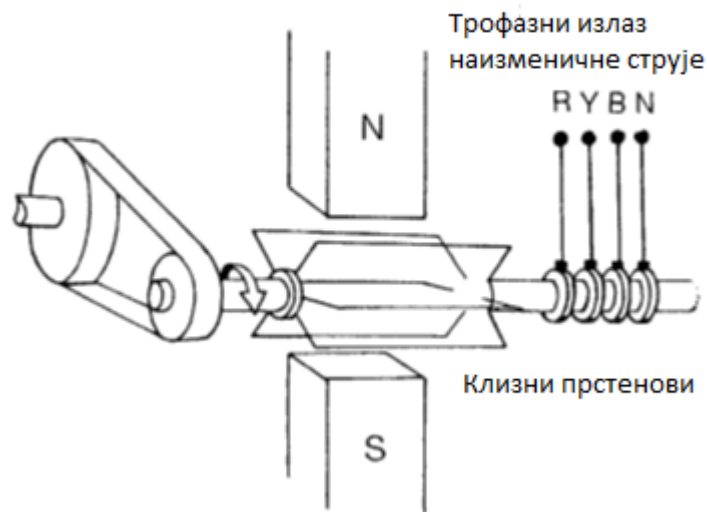
Дакле, за производњу електричне енергије у хидроелектранама највише се користе трофазни генератори. У зависности од карактеристика мреже коју мале хидроелектране снабдевају електричном енергијом разликују се два типа генератора:

- синхрони,
- асинхрони.

5.1 Синхрони генератори (алтернатори)

Синхрони генератори се користе за мале хидроелектране када агрегат мора стално да ради острвски. Синхрони генератор са свим својим карактеристикама, а посебно са аутономношћу, има и стратегијске предности у случају распада енергетског система. [5]

Трофазни синхрони генератор је у принципу склоп од три једнофазна генератора у једном, који користе исто магнетно поље које је илустровано на слици 5.1.1. [10]



5.1.1 Трофазни синхрони генератор [10]

Конструкција трофазних синхроних генератора је различита, и то не само због различите снаге већ и због брзине којом се окрећу. Сви они имају на ротору електромагнете побуђене једносмерном струјом, а у статору производе трофазну наизменичну струју. [15]

С обзиром да су номиналне снаге синхроних генератора релативно велике, њихови побудни намотаји стављају се на ротор јер је лакше преко клизних прстенова и четкица побудном намотају доводити једносмерну побудну струју ниског напона него са ротора преко клизних прстенова и четкица одводити трофазну наизменичну струју високог напона (3 kV до 21 kV), када би на ротору био смештен трофазни намотај. Према томе на статору синхроних генератора смештени су трофазни намотаји из којих се директно добија трофазна наизменична струја. Код синхроних генератора сасвим малих снага (неколико kV) може се побудни намотај сместити на статор а трофазни намотај на ротор. У овим случајевима трофазна наизменична струја се са роторског трофазног намотаја одводи преко клизних прстенова и четкица. [9]

Сваки синхрони генератор у електрани има побудни систем. Основни задатак побудног система је да генерише једносмерну побудну струју и да омогући регулацију напона генератора у задатом опсегу. Поред овог основног задатка побудни системи великих синхроних машина имају задатак да повећају опсег стабилног рада генератора, како у стационарним режимима, тако и у случају кварова или других крупних поремећаја у електроенергетском систему. Од побудног система синхроне машине захтева се:

- да буде економичан и поуздан;

- да омогући регулацију побудног напона у задатом опсегу;
- да код великих генератора омогући брз пораст побудне струје у случају великих поремећаја у електроенергетском систему;
- да у случају потребе омогући брзо укидање (елиминисање) побудног флуksа (поља) генератора. Таква потреба јавља се при кваровима у генератору.

У зависности од радног режима синхроне машине побудни систем мора бити у стању да поуздано одржава различите вредности побудне струје. Побудни систем мора бити у стању да у случају хаваријских режима довољно брзо смањи или укине побудну струју.

Синхрони генератори могу бити:

- са четкицама и уређајем за одржавање константног напона
- са четкицама, уређајем за константни напон и тиристорским регулатором.

Синхрони генератори могу бити и без четкица и према узбуднику су подељени на:

- генераторе без четкица са уређајем за константни напон и тиристорским регулатором,
- генераторе без четкица са транзиторским регулатором напона и струјном потпором и
- генераторе без четкица са тиристорским регулатором напона и струјном потпором. [5]

Генератори без четкица са уређајем за константни напон и тиристорским регулатором, разликују се од генератора са четкицама по томе што су мањих димензија, јер је узбудна снага ових генератора због присуства синхроног узбудника много мања. Међутим, у генераторима без четкица неопходно је коришћење регулатора напона због елиминисања утицаја промене отпора главног ротора.

У генератору без четкица са транзиторском регулацијом напона и струјном потпором узбуда се осигурава преко транзиторског регулатора, док је утицај струјне потпоре незнатан.

Генератори без четкица са тиристорским регулатором напона и струјном потпором разликују се од генератора без четкица са транзиторском регулацијом напона и струјном потпором по томе што је узбудни систем остварен тиристорским регулатором.

Напон генератора се постиже помоћу полууправљивог транзисторског управљача који се напаја из једне фазе генератора. Регулатор напона је сачињен од мерног члана, регулационе јединице, импулсног склопа и полууправљивог тиристорског исправљача.

У генератору са четкицама узбудни уређај постиже напонску тачност од $\pm 2,5\%$, док генератори са четкицама и без четкица, који у свом узбудном систему имају уређаје за константни напон и тиристорски регулатор, имају статичку тачност од $\pm 0,5\%$ за сва оптерећења, од празног хода до номиналног, при факторима снаге од 0,8 до 1,0.

На генератору са четкицама ручно подешавање напона није могуће, док на генератору са четкицама и без четкица, са уређајима за константни напон и тиристорским регулатором, напон је могуће ручно подесити потенциометром.

5.3 Асинхрони генератори

Асинхрони генератори се употребљавају још од почетка 20. века, посебно у великим енергетским постројењима, али се сада више користе у малим хидроелектранама. [5]

Асинхрони генератори се израђују као трофазни за потребе малих хидроелектрана, јер су због своје специфичности погона вишег поларитета са могућношћу паралелног рада са мрежом.

Намотај статора је трофазно дистрибуирани намотај. Када је конектован на трофазно снабдевање, спора магнетизирана струја тече од снабдевања на нивоу који зависи од нивоа напона снабдевања и ствара ротирајуће магнетно поље у машини синхроне брзине директно одређеном фреквенцом снабдевања и броја полова намотаја статора као код синхроних генератора. Поље које се ствара је исто као и напонски ротор синхроних генератора где се окреће истом брзином. [10]

Узбудни асинхрони генератори су у самосталном раду врло осетљиви на врсту оптерећења. Захтеви врло велике тачности напона и фреквенције су непотребни. Шире границе промене напона и фреквенције олакшавају израду и омогућавају квалитетнији и сигурнији рад генератора. Обезбеђење напона и фреквенције у ужим границама захтева сложенију и компликованију регулацију. У тим случајевима се употребљавају релуктантни асинхрони генератори у које се уграђује посебан намотај и додаје регулатор. У неким генераторима користе се балансни потрошачи за регулацију излазног напона (грејачи, бојлери..). [5]

5.3.1 Асинхрони генератор за паралелан рад (асинхрони кавезни генератор)

Асинхрони мотор ради као генератор ако се његов ротор окреће већом брзином од синхроне. Ако се асинхрони мотор прикључи на електричну мрежу гони надсинхроно, мотор ће давати активну снагу и радиће као генератор. Побуда се добија додавањем кондензаторских јединица паралелно спојених на стезаљкама, а уз модификацију намотаја асинхрони мотор се оспособљава за самостални рад. Код ових генератора се реактивна струја магнетизирања, која је потребна за одржавање магнетног флукса, мора доводити споља. При паралелном раду генератори црпе реактивну струју из мреже. У тој мрежи, услед гоњења турбине, генератори враћају произведену струју, уз одређени губитак. То значи да су код ових уређаја генератори произвођачи али и мали потрошачи електричне енергије. [5]

Асинхрони генератори малих хидроелектрана са паралелним радом са дистрибутивном мрежом, по правилу, раде без људске снаге, а са краткоспојеним ротором не захтевају уређаје за регулацију напона, као ни уређаје за регулацију турбина. За ове машине треба додати да величину напона и фреквенцију одређује дистрибутивна мрежа.

5.3.2 Асинхрони генератор за самостални рад

Ови генератори се разликују од асинхроних са паралелним радом по томе што не добијају реактивну струју дистрибутивне мреже, него из прикључених кондензаторских јединица. У овим генераторима проблем су одржавање константног напона током рада. Да би се решио овај проблем ови генератори раде у две верзије:

- асинхрони генератори са стабилизованим излазним карактеристикама
- асинхрони генератори са регулисаним излазним карактеристикама [5]

Код *асинхроних генератора са стабилизованим излазним карактеристикама* се постиже тачност излазног напона $\pm 5\%$ у односу на номинални напон. Знак (+) односи се на празан ход док знак (–) представља номинално оптерећење генератора.

Стабилизација напона се код ових генератора постиже тако што се на изводне крајеве једнофазних или трофазних асинхроних генератора прикључује једна пригушница.

Ови генератори се не разликују од асинхроних мотора са улогом генератора, али је набавка додатних елемената, нарочито пригушница, веома скупа и мало се разликује од цене синхроних генератора, па се генератори са пригушницом ретко користе.

Варијанта оваквих генератора са засићеним магнетним колима, који су исти као најобичнији синхрони мотор, такође се не употребљава у малим хидроелектранама, између осталог и због тога:

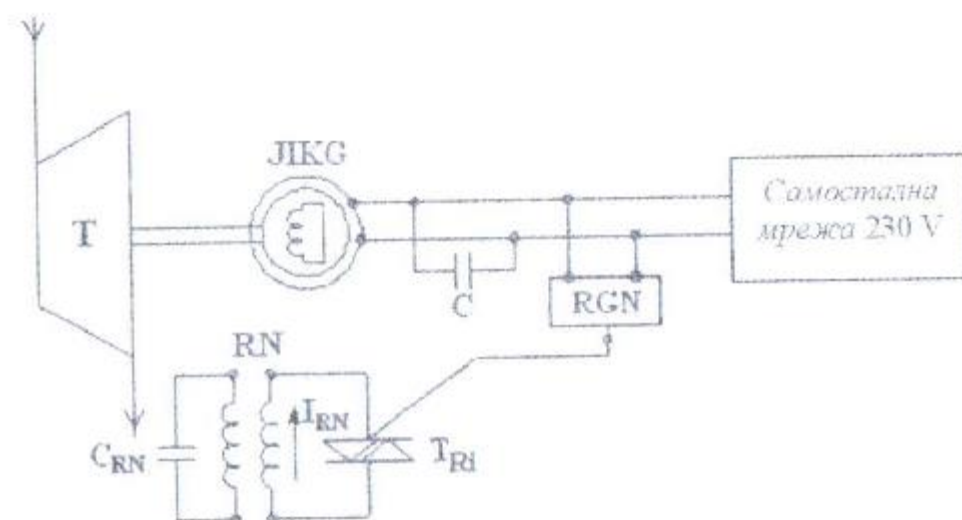
1. што се не могу у самосталном генераторском режиму користити уз исти номинални напон без уграђивања засићене пригушнице;
2. што се при избегавању пригушница мора извршити премотавање машине. За премотавање је потребно стручно знање из области прорачуна, а намотавање електричних машина се може урадити само у фабрици, што поскупљује израду генератора.

Код *асинхроних генератора са регулисаним излазним карактеристикама* тачност излазног напона $\pm 0,5\%$ у односу на номинални напон генератора постиже се помоћу управљивих полупроводника. Ови генератори се раде у две варијанте:

1. краткоспојени асинхрони генератори
2. релуктантни асинхрони генератори.

Краткоспојени асинхрони генератори се израђују као једнофазни, снаге до 5,0 кВА. Напон се регулише преко регулатора напона. У неоптерећеном стању генератор са искљученом траком има највећи напон.

Шема је приказана на слици 5.2.2.1. Сви конструкциони делови ових генератора су исти као и код стандардног једнофазног синхроног мотора. [9]



Слика 5.2.2.1 - Принципијелна шема микрохидроагрегата са једнофазног асинхроног генератора са краткоспојним регулационим намотајем на статору (Т-хидротурбина; ЈИГ- једнофазни индукциони генератор; RGN- регулатор напона; RN- намотај за регулацију; T_{RI} - триак; C- кондензатор на побуду; C_{RN} - кондензатор регулационог намотаја)

Одржавање константног и синусоидног излазног напона постигнуто је специјалним регулационим намотајем на статору који снабдевен са полупроводничким регулатором напона. Контролом угла провођења триака (T_{ri}) регулише се ефективна вредност струје I_{rn} кроз краткоспојени намотај и тако се пригушује флуks у магнетном колу генератора, тј. врши се контрола напона на статорским прикључцима генератора.

У празном ходу генератора угао паљења (T_{ri}) је близу 0° , тако да је струја I_{rn} максимална, па је максимално и пригушење флуksа, чиме се обара напон на прикључницима генератора на прописану вредност. При повећању оптерећења, управљачка електроника регулатора напона региструје тенденцију опадања излазног напона и повећава угао паљења триака (T_{ri}) до близу 180° , што одговара смањењу струје I_{rn} кроз регулациони намотај, па је ефекат пригушења магнетног флуksа минималан. Регулациони намотај својим магнетним дејством не засићује магнетно коло једнофазног асинхроног генератора, већ само мења укупни ниво флуksа.

Релуктантни асинхрони генератори су према механичкој изради идентични кавезним асинхроним машинама, с тим што статор генератора поред главног намотаја поседује и намотај за регулацију, а на стезаљкама је прикључена кондензаторска јединица за побуду као и регулатор напона. [5]

Регулациони систем садржи само један намотај, а регулациони круг само два члана са преносном функцијом.

Регулатор напона се састоји из мерног напонског контролника, регулатора, импулсне јединице, извора за напајање и тиристорског моста.

У пракси се асинхрони генератори најчешће користе, како за паралелни, тако и за самостални рад. Међутим, постоје велики захтеви за комбиновани рад генератора [10]. Изоловани рад индукционог (асинхроног) кавезног генератора могућ је ако се обезбеди самопобуђивање асинхроног генератора од стране реманентног поља ротора и одржавања потребне реактивне снаге помоћу кондензаторских батерија оточно прокључених на крајевима статора. [9]

Недостаци асинхроних генератора са самосталним радом су да приликом наглог растерећења долази до недозвољеног повећања излазног напона услед тромости турбинског регулатора да спречи повећање брзине обртања брзим смањењем отвора спроводног апарата. Као последица тога јавља се пренапон на статорским прикључцима.

Пораст напона може се смањити додавањем замајне масе на вратилу генератора или турбине. Међутим, показало се да ова додатна замајна маса није довољна, па се користи балансно електрично оптерећење. Приликом искључења већих потрошача истовремено се укључује једно балансно електрично оптерећење а затим се постепено искључује. Као балансно електрично оптерећење користе се регулациони отпорници са полипроводничким управљањем.

Треба истаћи да асинхрони генератори могу задовољити потребе малих хидроелектрана. [5]

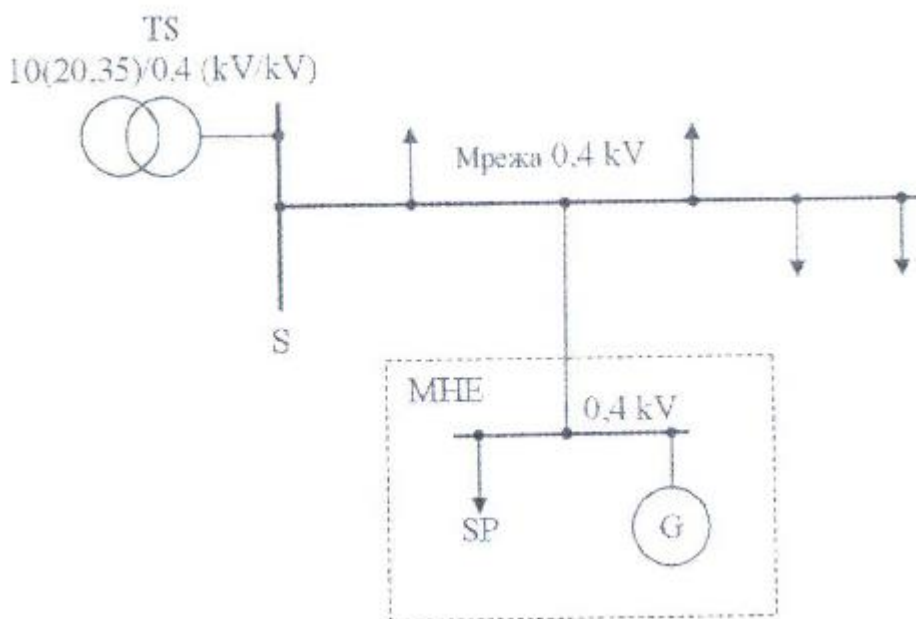
6.0 Везивање мале хидроелектране на мрежу ЕЕС

Везивање мале хидроелектране на мрежу ЕЕС-а (електроенергетског система), зависи од снаге и броја агрегата, напона прикључака, удаљености мреже ЕЕС-а, конфигурације мреже и слично. [9]

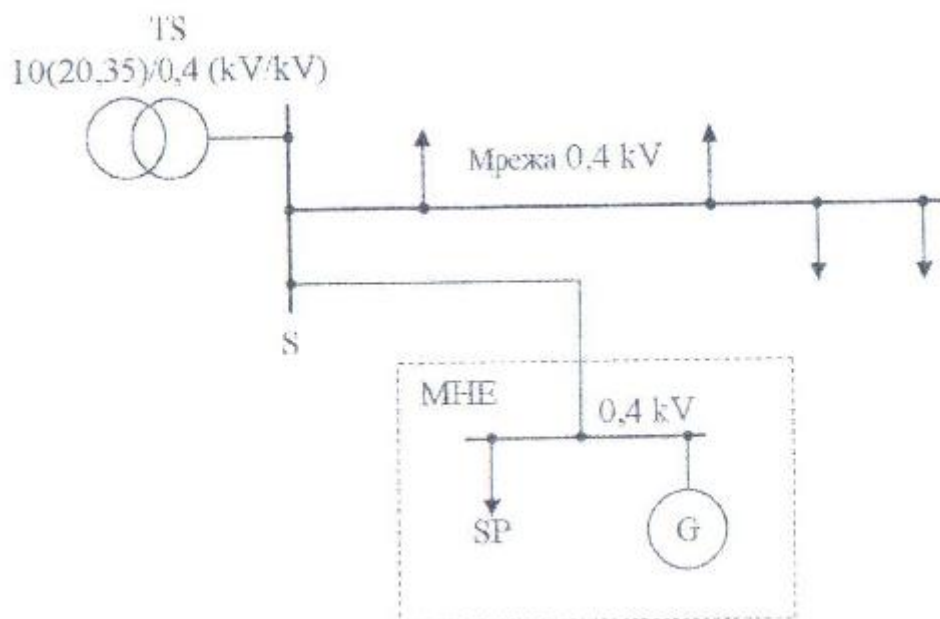
Везивање се изводи:

- код малих хидроелектрана снаге до 100 kW на нисконапонску мрежу ако је постојећа мрежа квалитетна и ако је њена расположивост велика,
- код малих хидроелектрана снаге од 100 kW до 1 MW на нисконапонску или средњенапонску мрежу,
- код малих хидроелектрана од 1 MW до 10 MW на средњенапонску мрежу.

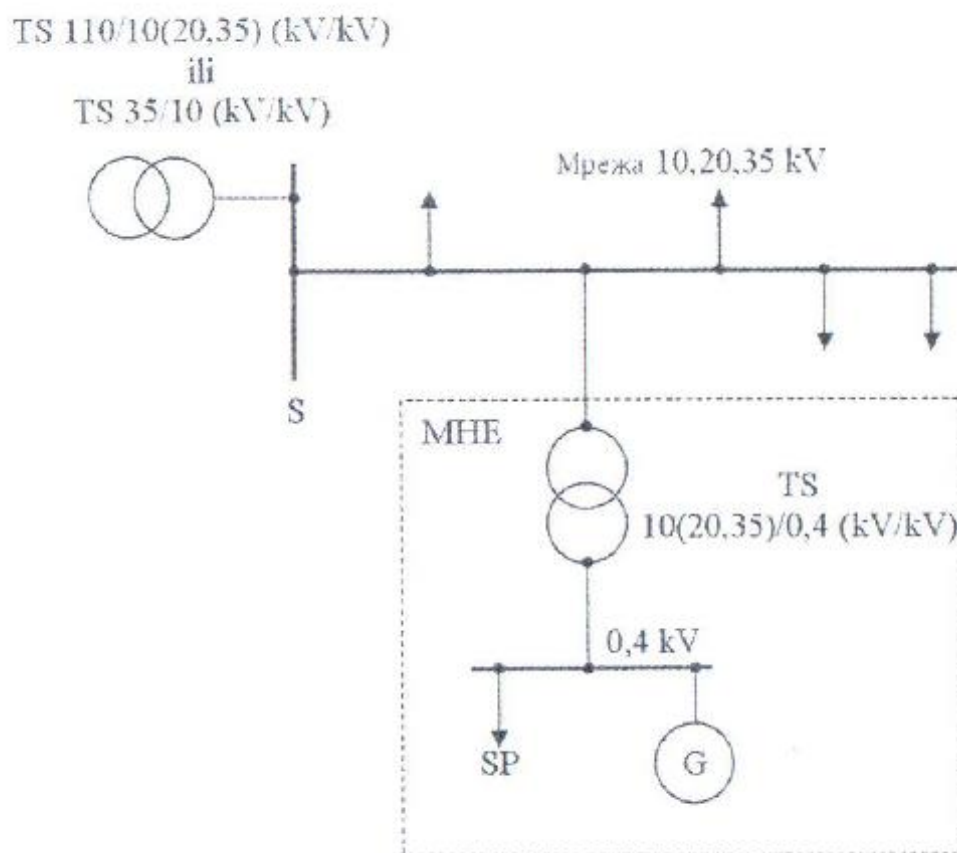
Принципске шеме везивања малих хидроелектрана на електродистрибутивну мрежу приказане су на сликама.



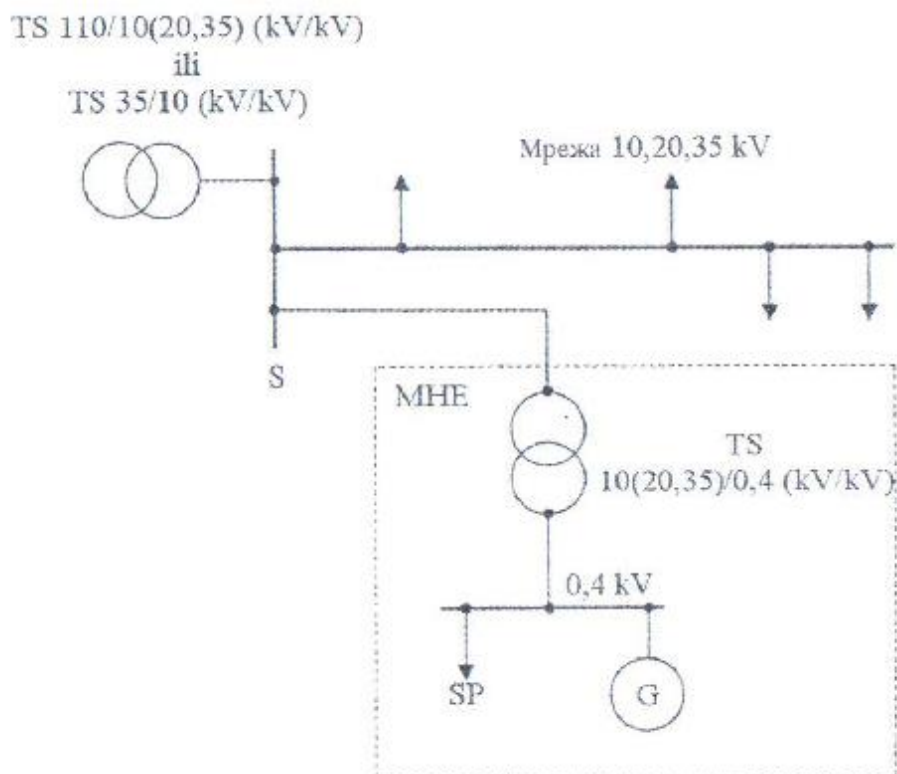
Слика 6.0.1 - Принципска шема повезивања МХЕ директно на нисконапонску мрежу 0,4 kV [9]



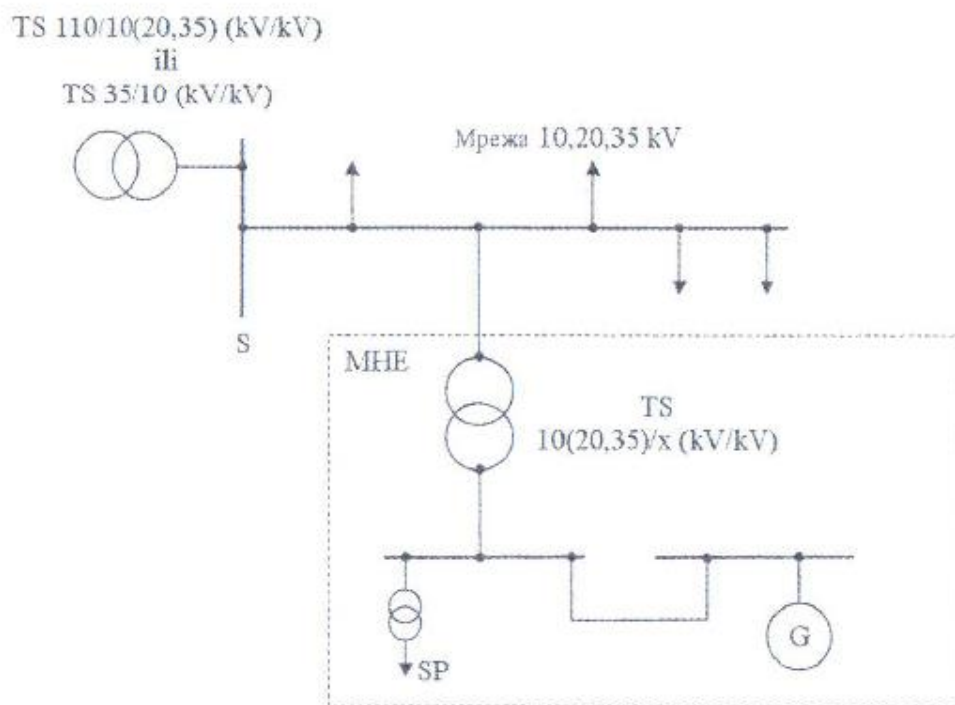
Слика 6.0.2 - Принципска шема повезивања МХЕ директно на нисконапонску страну трансформаторске станице TS 10 (20,35)/0,4 kV [9]



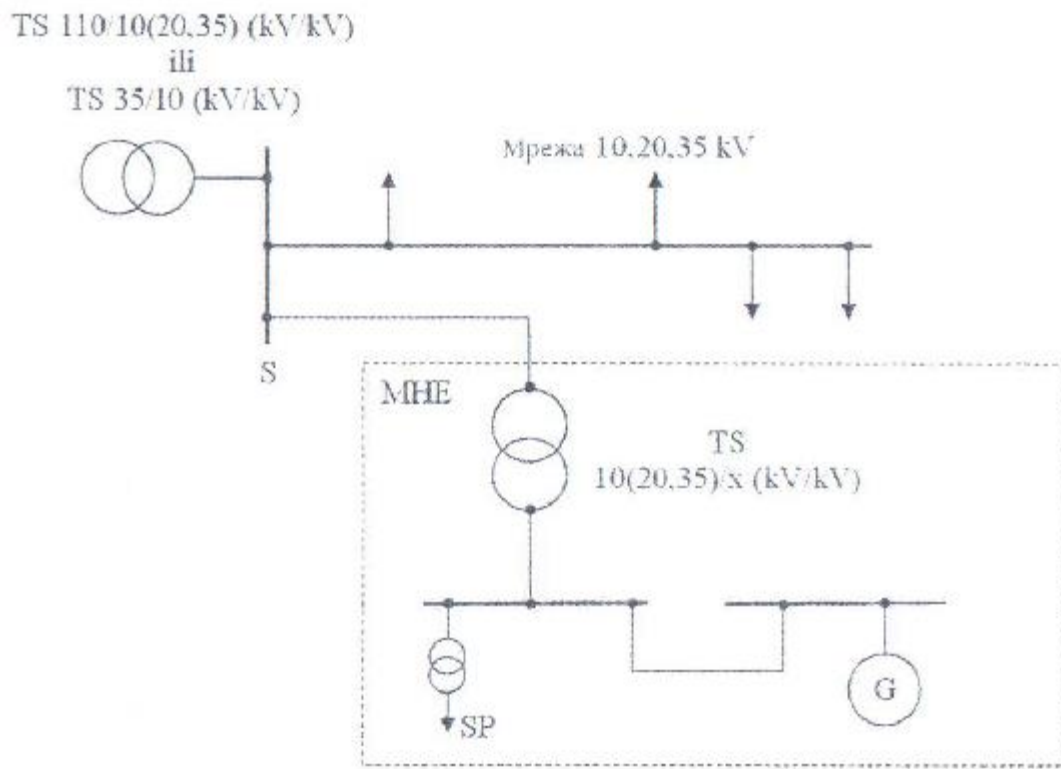
Слика 6.0.3 - Принципска шема повезивања МХЕ директно на средњенапонску мрежу 10 (20,35) kV [9]



Слика 6.0.4 - Принципска шема повезивања МХЕ директно на ниженапонску страну трансформаторске станице $TS\ 110/10\ (20,35kV)$, $(TS\ 35/10\ kV)$ [9]



Слика 6.0.5 - Принципска шема повезивања МХЕ, која садржи генератор високог напона, директно на средњенапонску мрежу $10\ (20,35)\ kV$ [9]



Слика 6.0.6 - Принципска шема повезивања МХЕ, која садржи генератор високог напона, на ниженапонску страну трансформаторске станице TS 110/10 (20,35) kV, (TS 35/10 kV) [9]

Номинални напон генератора зависи од снаге малих хидроелектрана, начина рада и удаљености прикључка на дистрибутивну мрежу. Из тих разлога може да има различите вредности: 0.42 kV, 3.15 kV, 6.3 kV, 10kV. Ако се назначени напон генератора разликује од вредности номиналног напона електродистрибутивне мреже на коју се прикључује, потребно је применом међутрансформације ускладити напоне и фазне ставове генератора са вредностима номиналног напона у електродистрибутивној мрежи.

За прикључење мале хидроелектране на мрежу ЕЕС потребно је да се задовоље прописани технички услови за прикључење. У Србији, према Техничкој препоруци бр. 16 на електродистрибутивну мрежу може да се прикључи мала хидроелектрана ако испуњава следеће услове:

1. Задовољавање дефинисаних критеријума:

- Критеријум дозвољене снаге мале хидроелектране,
- Критеријум фликера,
- Критеријум дозвољених струја виших хармоника и
- Критеријум снаге кратког споја,

2. Опремљеност одговарајућом релејном заштитом и
3. Испуњавање захтева прописа о заштити животне средине.

Закључак

Хидроенергија је једна од најзаступљенијих обновљивих извора енергије, која је у 2012. представљала више од 16% коришћене електричне енергије у свету. Међутим, хидроенергија добија далеко мање простора у медијима, јер је стара технологија са много мањом годишњом стопом раста од већине обновљивих извора енергије.

Хидроелектрана као развијена технологија, може бити и јефтина. Њена изградња захтева висока почетна инвестирања, али од свих врста електрана имају најдужи век и ниске трошкове одржавања.

Пројекат за развој малих хидроелектрана обично траје од 2 до 5 година. Једном конструисана, мала хидроелектрана захтева мало одржавање током радног века, што може бити и преко 50 година. Наравно, један повремени радник може лако да обавља рутинска одржавања за малу хидроелектрану, уз периодично одржавање великих компоненти које обично захтева помоћ самог произвођача.

Трошкови инвестиција малих хидроелектрана углавном зависе од грађевинских радова и електро-машинске опреме. Трошкови електро-машинске опреме су 30% од укупних трошкова али ако се ова опрема адекватно не изабере цео пројекат изградње мале хидроелектране неће бити исплатив. Зато електро-машинска опрема представља један од важних елемената малих хидроелектрана.

Литература

- [1] <http://shps.rs/index.php/hidroenergija-i-male-hidroelektreane>
- [2] <http://www.scribd.com/doc/101712553/9/HIDROENERGIJA>
- [3] Јаћим Перић, *Хидраулични мотори и постројења*, Знање, Београд, 1952.
- [4] <http://www.scribd.com/doc/100678730/Seminarski-Proracun-Malih-HE>
- [5] Мирослав Михајловић, *Мале хидроелектране – пројектовање и изградња*, Хидропројект, Београд, 1985.
- [6] Душан Гордић: *Обновљиви извори енергије 2 – мале хидроелектране*, скрипта, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 2010.
- [7] Горан Шего, *Хрватске хидроелектране*, Факултет електротехнике и рачунарства, Загреб, 2011.
- [8] Група аутора, *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*, ESHA, 2004.
- [9] Миленко Ђурић, Жељко Ђуришић, Александар Чукарић, Веселин Илић, *Електране*, Беопрес, Београд, 2010.
- [10] Adam Harvey, *Micro-hydro design manual- A guade to small-scale water power schemes*, Intermediate Technology Publications, London, 1993.
- [11] Милун Бабић, Светислав Стојковић, *Турбомашине-Теорија и математичко моделирање*, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 1997.
- [12] Група аутора, *Инжењерско-машински приручник*, ЗУНС, Београд, 1992.
- [13] Вера Николић, *Машински елементи*, Машински факултет Крагујев, Крагујевац, 2004.
- [14] <http://www.scribd.com/doc/24018362/73/Dimenzioniranje-vratila>
- [15] Драгутин Каисер, *Електротехника*, Техничка књига, Загреб, 1966.